

А. Г. ЧЕРТОВ

# ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ





А. Г. ЧЕРТОВ

# ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

(Терминология, определения, обозначения,  
размерности, единицы)



МОСКВА • ВЫСШАЯ ШКОЛА • 1990



ББК 22.3  
Ч-50  
УДК 53.081

Рецензенты:

Л. А. Сена (Ленинградский политехнический институт),  
Г. П. Сафаров (Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы)

Чертов А. Г.

Ч-50 Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): Справ. пособие.— М: Высш. шк., 1990.— 335 с.: ил.

ISBN 5-06-001011-2

В пособии рассматриваются физические величины по всем разделам курса физики. При этом используются современная терминология, обозначения, определения. В справочнике даны размерности физических величин и их единицы как в СИ, так и внесистемные. Приведены соотношения внесистемных единиц физических величин с единицами СИ. Рассмотрены понятия о погрешностях измерения физических величин. Приведены современные значения фундаментальных физических постоянных.

Ч 1604010000(4309000000)—389  
001(01)—90 104—90

ББК 22.3  
531.7

ISBN 5-06-001011-2

© А. Г. Чертов, 1990

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	6
Глава 1. Физические величины. Системы величин. Размерности физических величин. Системы единиц.....	9
§ 1.1. Физическая величина. Размер и значение физической величины.....	9
§ 1.2. Числовое значение величины. Единица физической величины.....	11
§ 1.3. Термин. Терминология.....	13
§ 1.4. Обозначения физических величин.....	14
§ 1.5. Математические операции с физическими величинами.....	16
§ 1.6. Уравнения, выражающие связь между физическими величинами.....	17
§ 1.7. Системы физических величин.....	19
§ 1.8. Размерности физических величин.....	21
§ 1.9. Системы единиц физических величин.....	26
§ 1.10. Внесистемные единицы.....	34
§ 1.11. Нормативные документы, регламентирующие применение в СССР единиц физических величин.....	35
Глава 2. Пространство и время.....	38
§ 2.1. Пространство.....	38
§ 2.2. Время.....	46
Глава 3. Механика.....	51
§ 3.1. Кинематика.....	51
§ 3.2. Динамика.....	58
§ 3.3. Основные понятия статики.....	80
Глава 4. Теплота.....	83
§ 4.1. Основные понятия.....	83
§ 4.2. Тепловые величины.....	88
Глава 5. Электричество и магнетизм.....	103
§ 5.1. Электростатика.....	103
§ 5.2. Электрический ток.....	116
§ 5.3. Магнетизм.....	125
§ 5.4. Рационализация уравнений электромагнитного поля.....	136
Глава 6. Колебания и волны.....	137
§ 6.1. Колебания.....	137
§ 6.2. Волны.....	147



<b>Глава 7. Акустика.....</b>	<b>155</b>
§ 7.1 Основные понятия.....	155
§ 7.2. Акустические величины.....	157
§ 7.3 Уровни акустических величин. Логарифмические величины.....	162
§ 7.4. Субъективные характеристики звука. Некоторые понятия музыкальной акустики.....	165
<b>Глава 8. Оптика.....</b>	<b>169</b>
§ 8.1 Основные понятия.....	169
§ 8.2. Энергетические фотометрические величины.....	171
§ 8.3 Световые величины.....	178
§ 8.4. Поляризация света.....	184
§ 8.5. Тепловое излучение.....	189
§ 8.6. Оптические параметры и характеристики веществ, тел, процессов.....	190
§ 8.7. Геометрическая оптика.....	196
<b>Глава 9. Физическая химия и молекулярная физика.....</b>	<b>201</b>
§ 9.1. Основные понятия.....	201
§ 9.2. Физические величины.....	205
<b>Глава 10. Атомная и ядерная физика.....</b>	<b>219</b>
§ 10.1. Основные понятия.....	219
§ 10.2. Физические величины атомной и ядерной физики.....	233
<b>Глава 11. Ионизирующие излучения.....</b>	<b>240</b>
§ 11.1 Основные понятия.....	240
§ 11.2. Величины и единицы, характеризующие ионизирующие излучения.....	242
§ 11.3. Величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.....	247
§ 11.4. Дозиметрические величины и единицы.....	252
§ 11.5. Радиационные величины и единицы, характеризующие источники ионизирующих излучений.....	258
<b>Глава 12. Терминология и определения основных понятий квантовой механики и квантовой теории твердого тела.....</b>	<b>264</b>
§ 12.1 Квантовая механика.....	264
§ 12.2. Квантовая теория твердого тела.....	278
<b>Приложения</b>	
1 Правила образования когерентных производных единиц СИ (по ГОСТ 8.417—81).....	290
2. Правила образования десятичных кратных и дольных единиц, а также их наименований и обозначений (по ГОСТ 8.417—81).....	291
3. Правила написания обозначений единиц (по ГОСТ 8.417—81).....	292
4. Практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68).....	294

<b>Таблицы.....</b>	<b>297</b>
1. Обозначения единиц физических величин.....	297
2. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ (ГОСТ 8.417—81).....	298
3. Перечень некоторых относительных и логарифмических величин и их единиц.....	299
4. Единицы, временно допущенные к применению.....	301
5. Единицы системы СГС, имеющие собственные наименования, и некоторые внесистемные единицы, применяемые в теоретической физике.....	302
6. Соотношения между единицами электромагнитных величин.....	303
7. Единицы естественных систем.....	304
8. Соотношение внесистемных единиц радиоактивности и ионизирующих излучений с единицами СИ.....	306
9. Некоторые уравнения электромагнетизма в СИ (рационализованная форма) и в системе СГС.....	308
10. Фундаментальные физические постоянные.....	310
11. Соотношения между единицами физических величин.....	312
12. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований.....	326
<b>Литература.....</b>	<b>327</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>330</b>



За последние два-три десятилетия как у нас в стране, так и за рубежом проведена большая работа по совершенствованию научно-технической терминологии, в том числе и терминологии физических величин.

Работу эту в нашей стране возглавляют Всесоюзный научно-исследовательский институт технической информации, классификации и кодирования (ВНИИКИ) Государственного комитета СССР по стандартизации и Комитет научно-технической терминологии АН СССР (КНТТ АН СССР).

Результаты работы ВНИИКИ в области терминологии физических величин реализуются в виде государственных стандартов СССР. Госты устанавливают термины и обозначения величин, обязательные для применения в науке, технике и производстве в документации всех видов, научно-технической, учебной и справочной литературе. Для каждой физической величины устанавливается одно наименование (термин). Применение терминов-синонимов стандартизованного термина не рекомендуется. То же и в обозначениях физических величин.

Результаты работы КНТТ АН СССР по совершенствованию научно-технической терминологии публикуются в его «Сборниках рекомендуемых терминов». В таких сборниках кроме терминов имеются также рекомендуемые определения и обозначения физических величин.

Международные терминологические стандарты разрабатываются Международной организацией по стандартизации (ИСО), Международной электротехнической комиссией (МЭК), Постоянной комиссией по стандартизации Совета экономической взаимопомощи (СЭВ) и др.

Рекомендации по терминологии и обозначениям публикуют также международные научные организации: Международный союз чистой и прикладной физики, Международный союз чистой и прикладной

химии, Международная светотехническая комиссия и др.

В государственных стандартах, а также в терминологических сборниках КНТТ АН СССР и документах международных научных организаций кроме терминов и обозначений даются определения физических величин и других научных понятий. Определения содержат необходимые и достаточные признаки понятий, исключающие неоднозначное толкование или неправильное использование соответствующих терминов, устанавливают границы понятий.

К сожалению, результаты работы по совершенствованию терминологии, обозначений и определений физических величин, реализованные в стандартах и других нормативных документах, очень медленно проникают на страницы вузовских учебных пособий по физике и по смежным с ней общетехническим дисциплинам: во многих пособиях применяется устаревшая терминология, существует разноречивость в наименованиях и обозначениях, даются нестрогие определения физических величин и других научных понятий.

Все это создает серьезные, ничем не оправданные трудности для обучающихся.

Почему же, несмотря на то что терминология и обозначения физических величин разработаны и, более того, узаконены, в учебных пособиях не используются результаты проводимой как в нашей стране, так и в международном масштабе работы по совершенствованию научно-технической терминологии?

Одна из причин этого, по-видимому, состоит в том, что как терминологические стандарты, так и Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР издаются крайне ограниченными тиражами и после выхода в свет становятся библиографической редкостью.

Создавшееся положение побудило автора написать справочное пособие, в котором для всех физических величин использованы только стандартизованные или рекомендованные соответствующими компетентными организациями термины, обозначения и определения величин.

В пособии рассмотрены физические величины всех разделов курса физики для высших технических учебных заведений. При этом для каждой величины



приведено наименование, обозначение и определение, а также даны определяющие уравнения. С помощью определяющих уравнений получены размерности и единицы физических величин. Кроме того, в пособии приведены определения многих других научных понятий, знание которых необходимо для понимания физического смысла величин.

Справочное пособие предназначено для студентов высших технических учебных заведений.

Автор адресует свою книгу также преподавателям физики и смежных с ней инженерных дисциплин вузов. Она может быть полезной авторам учебных пособий и работникам издательств, выпускающих учебную литературу для вузов.

Автор выражает благодарность доцентам А. А. Воробьеву, С. М. Голынскому, П. В. Елютину и В. П. Иванову, прочитавшим рукопись и сделавшим ряд полезных замечаний.

В процессе работы по изучению научно-технической терминологии автору оказали помощь ст. инженер ВНИИКИ Л. И. Короткова и ст. научный сотрудник КНТТ АН СССР В. Ф. Журавлев. Искренне благодарю их.

Особую благодарность выражаю рецензентам рукописи проф. Л. А. Сена и ст. научному сотруднику Г. А. Сафарову, чьи замечания позволили автору значительно улучшить справочное пособие.

Автор будет благодарен за замечания и советы по улучшению пособия. Можно направлять их в издательство «Высшая школа» по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

*Автор*

## Глава 1

### ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. СИСТЕМЫ ВЕЛИЧИН. РАЗМЕРНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

#### § 1.1

#### ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА. РАЗМЕР И ЗНАЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

При изучении физики и других научных и технических дисциплин мы встречаемся с большим числом физических величин.

Что же такое физическая величина? Чем она отличается от многих других научных и технических понятий?

● Физическая величина (величина)<sup>1</sup> — характеристика одного из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общая в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта [80]<sup>2</sup>.

\* 1. Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что значение величины или размер величины может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

2. Термин «физическая величина» применяется для описания материальных систем, объектов (явлений, процессов и т. п.), изучаемых в любых науках (физике, химии и др.).

3. Применение краткой формы термина «величина» вместо термина «физическая величина» допустимо только в том случае, когда из контекста ясно, что речь идет именно о физической величине, а не о математической.

Не следует применять термин «величина» для выражения только количественной стороны рассматриваемого свойства.

<sup>1</sup> Здесь и далее в круглых скобках указывается краткая форма термина, рекомендованная к применению.

<sup>2</sup> Здесь и далее в квадратных скобках указывается источник (государственный стандарт СССР, международный стандарт или иной нормативный документ), из которого взяты термин и определение физической величины или иного понятия.



Например, нельзя говорить или писать «величина массы», «величина площади», «величина силы тока» и т. д., так как эти характеристики (масса, площадь, сила тока) сами являются величинами. В этих случаях следует применять термины «размер величины» или «значение величины».

● **Размер физической величины (размер величины)** — количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу [80].

● **Значение физической величины (значение величины, значение)** — оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц [80].

\* Значение величины не следует смешивать с размером. Размер физической величины данного объекта существует реально и независимо от того, знаем мы его или нет, выражаем его в каких-либо единицах или нет. Значение же физической величины появляется только после того, как размер величины данного объекта выражен с помощью какой-либо единицы.

Значение физической величины получают в результате измерения или вычисления.

● **Истинное значение физической величины (истинное значение величины, истинное значение)** — значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующую физическую величину [19].

\* Истинное значение физической величины может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений. Для каждого уровня развития измерительной техники мы можем знать только действительное значение физической величины, которое применяется вместо истинного значения физической величины. Понятие истинного значения физической величины необходимо как теоретическая основа развития теории измерений, в частности при раскрытии понятия «погрешность измерений».

● **Действительное значение физической величины (действительное значение величины, действительное значение)** — значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может его заменить [19].

\* За действительное значение физической величины обычно принимают среднее арифметическое из ряда значений величины, полученных при равнооточных измерениях, или арифметическое среднее взвешенное при неравнооточных измерениях.

● **Физический параметр (параметр)** — физическая величина, рассматриваемая при измерении данной физической величины как вспомогательная характеристика этой величины [80].

\* При измерении электрического напряжения переменного тока частоту тока рассматривают как параметр напряжения. Иногда

термин «физический параметр» применяют во множественном числе, например «параметры движения», «параметры электрических цепей». В этом случае под термином обычно понимают наиболее существенные физические величины, которые характеризуют движение тел, или электрические цепи переменного тока.

● **Влияющая физическая величина (влияющая величина)** — физическая величина, измерение которой не предусмотрено данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений физической величины, для которой предназначено средство измерений [80].

● **Род физической величины (род величины)** — качественная определенность физической величины [80].

\* Величины, которые можно сравнивать между собой количественно, относятся к одному роду, являются однородными. Так, высота Эйфелевой башни, радиус Земли, расстояние между зрачками ваших глаз — величины однородные. Аналогично, однородными величинами являются масса покоя электрона, масса эталона килограмма, хранящегося в Международной палате мер и весов в г. Севре (около Парижа), масса книги, которую вы сейчас читаете.

● **Аддитивная величина** — физическая величина, разные значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены друг на друга [80].

\* К аддитивным величинам относятся длина, масса, сила, давление, время, скорость и др.

● **Неаддитивная величина** — физическая величина, для которой умножение на числовой коэффициент или деление друг на друга ее значений не имеют физического смысла [80].

\* К неаддитивным величинам относят температуру по Международной практической температурной шкале (см. Приложение 4), твердость материалов, активность водородных ионов и др.

● **Измеряемая физическая величина (измеряемая величина)** — физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи [80].

## § 1.2

### ЧИСЛОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ. ЕДИНИЦА ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

● **Числовое значение физической величины (числовое значение величины, числовое значение)** — отвлеченное число, входящее в значение величины. Для конкретной



физической величины ее числовое значение зависит от размера выбранной единицы [19].

• Единица физической величины (единица величины, единица)<sup>1</sup> — физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных физических величин [80].

Единица физической величины — величина того же рода, что и сама физическая величина.

Если условиться обозначать единицу физической величины символом самой величины, заключенным в квадратные скобки<sup>2</sup>, и числовое значение величины буквой  $n$ , то значение величины  $Q$  может быть выражено равенством

$$Q = n[Q], \quad (1.1)$$

т. е. значение любой физической величины одного рода величин может быть выражено произведением числового значения величины на выбранную для этой величины единицу.

Если величину  $Q$  в формуле (1.1) выразить в другой единице  $[Q]'$ , которая в  $k$  раз больше  $[Q]$  (т. е.  $[Q]' = k[Q]$ ), то новое числовое значение  $n'$  будет в  $k$  раз меньше  $n$  (т. е.  $n' = n/k$ ). Произведение же  $n'[Q]'$  равно произведению  $n[Q]$ , т. е. значение физической величины  $Q$  не зависит от выбора единиц. Например, длина  $l$  карандаша марки «Копир. ТМ-66», выпускаемого фабрикой им. Красина, равна 202 мм. Изменив единицу длины и перейдя от миллиметров к сантиметрам ( $1 \text{ мм} = 0,1 \text{ см}$ ), получим

$$l = 202 \text{ мм} = 202 \cdot 0,1 \text{ см} = 20,2 \text{ см}.$$

Следовательно, числовое значение физической величины с изменением размера единицы изменяется.

Разумеется, значение величины и ее размер при этом будут одними и теми же.

В соответствии с [35] числовое значение величины, выраженной в какой-либо единице, можно указать путем заключения обозначения величины в фигурные скобки с добавлением обозначения единицы в качестве подстрочного индекса, например

<sup>1</sup> В международной практике применяют термин «единица измерений» [80].

<sup>2</sup> Такое обозначение установлено [35] и использовано в [80].

$$\{l\}_{\text{мм}} = 202 \quad \text{или} \quad \{l\}_{\text{см}} = 20,2.$$

Допускается также указывать числовое значение без фигурных скобок, добавляя к обозначению величины обозначение единицы в качестве подстрочного индекса (например,  $l_{\text{мм}} = 202$ ) или представляя числовое значение в виде отношения обозначения величины к обозначению единицы (например,  $\frac{l}{\text{мм}} = 202$  или  $l/\text{мм} = 202$ ).

### § 1.3

#### ТЕРМИН. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Наименования физических величин и других научно-технических понятий называются терминами. Так как развитие науки и техники — процесс в какой-то мере стихийный, то в ходе развития науки одна и та же физическая величина получила не одно наименование, имела не один термин, а несколько.

Разные термины одной и той же физической величины называются терминами-синонимами, а наличие у одной величины нескольких терминов-синонимов называется синонимией. Синонимия создает серьезные затруднения при научных общениях ученых разных стран, разных научных областей, вызывает ничем не оправданные трудности для обучающихся. Поэтому на определенной стадии развития науки возникает потребность унифицировать термины, упорядочить терминологию<sup>1</sup>. В этих целях принимаются как государственные в отдельных странах, так и международные терминологические стандарты, в которых для каждой физической величины устанавливается один термин. Применение терминов-синонимов не рекомендуется.

Иногда, когда термин состоит из нескольких слов (терминоэлементов), наравне со стандартизованным термином допускается к применению краткая форма термина в случаях, исключаящих

<sup>1</sup> Под терминологией здесь понимается совокупность терминов области науки, отрасли производства. Например, оптическая терминология, терминология машиностроения, медицинская терминология и т. п.



возможность их различного толкования. Например, термин «линейная скорость» имеет краткую форму «скорость», «электрический ток» — краткую форму «ток». В последующих главах данной книги, в которых рассматриваются физические величины разных разделов физики, краткая форма термина приводится после основного термина в скобках. В скобках после основного термина в ряде случаев приводится также термин-синоним, который не рекомендуется к применению. Перед ним в этом случае ставится знак «Нрк».

В некоторых, довольно редких случаях, в терминологических нормативных документах приводятся два параллельных термина-синонима, которые могут использоваться на равных основаниях. В дальнейшем, при пересмотре нормативных документов, синонимия устраняется и один из терминов-синонимов утверждается термином. В этом случае применение второго параллельного термина-синонима не рекомендуется. Например, в [12, 27, 53] для некоторых величин физической оптики были допущены к использованию по два термина-синонима: энергетическая светимость и излучательность, энергетическая освещенность и облученность, энергетическая яркость и лучистость, энергетическая сила света и сила излучения. При пересмотре указанных нормативных документов были утверждены в качестве терминов энергетическая светимость, облученность, энергетическая яркость, сила излучения. Термины — излучательность, энергетическая освещенность, лучистость и энергетическая сила света перешли в разряд терминов-синонимов, не рекомендуемых к применению.

#### § 1.4

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Обозначения физических величин, рекомендованные к применению в СССР, приведены в табл. 14. В эту таблицу включены обозначения, установленные Госстандартом СССР [8, 9, 11, 12, 23, 26, 41, 54], рекомендованные Комитетом научно-технической терминологии АН СССР, Международным союзом чистой и прикладной физики и Международной электротехнической комиссией МЭК [47, 58, 59, 62].

2. В качестве обозначений физических величин используются буквы латинского и греческого алфавитов, снабженные в случае необходимости индексами.

3. Индексы, как правило, располагаются с правой стороны внизу буквы.

В качестве правых нижних индексов преимущественно применяются:

а) арабские (реже римские) цифры для обозначения порядковых номеров. Например,  $p_1, p_2, p_3$  — парциальные давления первого, второго и третьего газов в газовой смеси;  $I_1, I_2, I_3$  — силы тока в первом, втором и третьем контурах электрической цепи;

б) буквы латинского или греческого алфавитов во всех тех случаях, когда эти индексы широко применяются в международном масштабе, например  $c_p$  и  $c_v$  — удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и при постоянном объеме;

в) строчные (реже прописные) буквы русского алфавита, соответствующие начальным буквам наименований процесса, состояния, детали и т. п., во всех тех случаях, когда отсутствуют стандартизованные международные индексы. Например,  $U_\phi$  — фазное напряжение,  $P_\nu$  — мощность возбуждения,  $\eta_a$  — коэффициент полезного действия антенны.

\* Индексы не должны содержать больше трех букв.

4. Реже применяются правые верхние и левые как нижние, так и верхние индексы.

В качестве верхних индексов, если не считать показателей степени, используются штрихи и римские цифры. Например,  $c', d^{IV}$ .

Левые индексы используются главным образом в атомной и ядерной физике, где они означают:

левый нижний индекс — зарядовое число изотопа (номер в периодической системе элементов), например  ${}_6\text{C}, {}_{11}\text{Na}$ ;

левый верхний индекс — массовое число изотопа (число нуклонов в ядре), например  $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}$  и т. п.

5. Допускаются к применению сложные индексы, являющиеся сочетанием простых:

а) сочетания двух-трех сокращенных русских слов; их отделяют одно от другого точками, после последнего сокращения точку не ставят; например, частота граничная верхняя  $\nu_{\text{гр.в}}$ ; коэффициент стоячей волны  $k_{\text{с.в}}$ ;



б) нескольких чисел в цифровой форме, их отделяют друг от друга запятой, например  $i_{1,2,3}$ ;

в) десятичной дроби и сокращенного слова или буквы; дробь отделяют от сокращенного слова или буквы точкой с запятой, например  $\sigma_{0,2;пл}$ .

6. Буквы латинского алфавита, обозначающие физические величины, пишутся наклонно (курсивом).

Исключение из этого правила составляет обозначение буквами латинского алфавита в прямом начертании для:

а) температуры в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ), Ренкина ( $^{\circ}\text{R}$ ), Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ );

б) тригонометрических, гиперболических функций, как, например,  $\cos$ ,  $\sin$ ,  $\arcsin$ ,  $\text{ch}$ ;

в) химических элементов и соединений, например  $\text{Cl}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{H}_6$ ;

г) чисел подобия —  $\text{Re}$  (Рейнольдса),  $\text{Pr}$  (Прандтля),  $\text{M}$  (Маха),  $\text{Zh}$  (Жуковского) и др.

## § 1.5

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ С ФИЗИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ<sup>1</sup>

1. Физические величины, принадлежащие к одной категории, т. е. однородные величины, можно складывать и вычитать.

2. Физические величины умножаются и делятся одна на другую согласно правилам алгебры:

а) произведение двух физических величин:

$$A \cdot B = \{A\}[A] \cdot \{B\}[B] = \{A\}\{B\} \cdot [A][B];$$

б) результат деления величины  $A$  на величину  $B$ :

$$\frac{A}{B} = \frac{\{A\}[A]}{\{B\}[B]} = \frac{\{A\}\{B\}}{\{B\}\{B\}} \cdot \frac{[A]}{[B]}. \quad (1.2)$$

\* Скорость  $v$  частицы при равномерном движении определяется как частное от деления расстояния  $\Delta l$ , пройденного за интервал времени  $\Delta t$ , на этот интервал времени. Таким образом, если частица прошла расстояние  $\Delta l = 6$  см за интервал времени  $\Delta t = 2$  мин, то ее скорость, согласно формуле (1.2), выражающей

правило деления величин, равна  $v = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{6 \text{ см}}{2 \text{ мин}} = \frac{6 \text{ см}}{2 \text{ мин}} = 3 \frac{\text{см}}{\text{мин}}$ .

<sup>1</sup> Содержание данного параграфа соответствует [35].

\* Автор считает необходимым отметить, что существует отличная от изложенного выше точка зрения по вопросу о делении и умножении физических величин. Так, известный специалист в области единиц физических величин и их размерности проф. Л. А. Сена считает<sup>1</sup>, что делить и умножать физические величины нельзя. Все деления и умножения величин суть только действия над именованными числами. Например, под произведением сторон прямоугольника при определении его площади следует понимать следующее: число, выражающее площадь прямоугольника, равно произведению чисел, выражающих его длину и ширину, при условии, что за единицу площади выбрана площадь квадрата, стороны которого равны выбранной единице длины. Или еще пример: истинное выражение известного закона динамики «сила равна произведению массы на ускорение» математически должно выглядеть так:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{m_2 a_2}{m_1 a_1}.$$

3. Аргументами показательных, логарифмических и тригонометрических функций и т. п. должны быть числа, числовые значения величин или безразмерные величины.

Пример. а)  $\exp[w/(kT)]$ , где  $w$  — энергия молекулы,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — термодинамическая температура;

б)  $\ln(p/\text{атм})$ , где  $p$  — давление, выраженное в атмосферах;

в)  $\sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$ , где  $t$  — время,  $T$  — период колебаний.

Во всех приведенных примерах в скобках — безразмерные величины.

## § 1.6

### УРАВНЕНИЯ, ВЫРАЖАЮЩИЕ СВЯЗЬ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Между физическими величинами существуют определенные связи и зависимости, которые могут быть выражены формулами, уравнениями.

Различают два вида уравнений: уравнения связи между величинами и уравнения связи между числовыми значениями.

● Уравнение связи между величинами (уравнение величин) — уравнение, отражающее законы природы, в котором под буквенными символами понимаются физические величины [80].

<sup>1</sup> См., например: Л. А. Сена. Единицы физических величин и их размерности. 3-е изд. М., 1988.



\* Уравнение  $s = vt$  отражает зависимость длины пути  $s$ , пройденного телом при равномерном движении, от скорости  $v$  тела и времени  $t$  его движения; уравнение  $a = F/m$  отражает зависимость ускорения  $a$ , сообщаемого телу определенной массы, от действующей на тело силы  $F$ . Форма уравнения величин не зависит от выбора единиц, в которых могут быть выражены входящие в уравнение физические величины. В уравнениях связи между величинами под буквенными обозначениями величин подразумеваются значения величин, т. е. произведение числового значения на единицу величины.

Коэффициент пропорциональности в уравнениях связи между величинами, за очень редкими исключениями, равен безразмерной единице (число 1).

\* Примером уравнения между величинами, в котором коэффициент пропорциональности отличен от единицы, является формула кинетической энергии  $T$  материальной точки или тела, движущегося поступательно:

$$T = \frac{1}{2} mv^2.$$

В дальнейшем мы встретимся с уравнениями связи между величинами, коэффициент пропорциональности в которых отличен от единицы. Это будет при рассмотрении уравнений электромагнитного поля, записанных в рационализованной форме.

Отметим, что независимо от того, равен ли коэффициент пропорциональности в уравнениях связи между величинами единице или отличен от нее, он остается постоянным и не зависит от единиц, в которых выражаются величины.

Как мы увидим далее, уравнения связи между величинами широко используются, особенно при определении производных единиц и размерностей физических величин, т. е. являются определяющими уравнениями.

● Уравнение связи между числовыми значениями (уравнение числовых значений) — уравнение, в котором под буквенными символами понимаются числовые значения величин, соответствующие выбранным единицам [80].

В отличие от уравнений связи между величинами форма уравнений связи между числовыми значениями зависит от выбора единиц, в которых выражены величины, входящие в уравнение.

Если в формуле скорости равномерного движения

$$v = l/t \quad (1.3)$$

скорость  $v$  выразить в километрах в час, длину пути  $l$  — в метрах, а время  $t$  — в секундах, т. е.

$$v = v_{\text{км/ч}} \text{ км/ч}, \quad l = l_{\text{м}} \text{ м}, \quad t = t_{\text{с}} \text{ с},$$

то по формуле (1.3) получим уравнение

$$v_{\text{км/ч}} \frac{\text{км}}{\text{ч}} = \frac{l_{\text{м}}}{t_{\text{с}}} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

или

$$v_{\text{км/ч}} = \frac{\text{ч}}{\text{с}} \frac{\text{м}}{\text{км}} \frac{l_{\text{м}}}{t_{\text{с}}}.$$

Из этого уравнения, учитывая, что  $1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$  и  $1 \text{ км} = 1000 \text{ м}$ , получим следующее уравнение связи между числовыми значениями:

$$v_{\text{км/ч}} = 3,6 \frac{l_{\text{м}}}{t_{\text{с}}}. \quad (1.4)$$

Таким образом, выразив скорость в километрах в час, длину пути — в метрах, время — в секундах, мы получили уравнение связи с числовым коэффициентом 3,6.

Если же выразить скорость в милях в час (1 миля = 852 м), длину пути — в ярдах (ярд — единица длины в системе английских мер; 1 ярд = 0,9144 м), время — в секундах, то уравнение между числовыми значениями примет вид

$$v_{\text{миль/ч}} = 2,045 \frac{l_{\text{ярд}}}{t_{\text{с}}}. \quad (1.5)$$

Рассмотренные примеры показывают, что вид уравнения связи между числовыми значениями зависит от выбранных единиц.

Чтобы не возникло недоразумений при использовании уравнений связи между числовыми значениями, следует всегда указывать единицы, в которых выражена каждая величина, входящая в уравнение, например в виде нижнего правого индекса, как это сделано в уравнениях (1.4) и (1.5).

## § 1.7

### СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Изучение связей между величинами показало, что эти связи не являются случайными и частными, а имеют широкий, можно сказать, общий характер. В частности, было установлено, что если произвольно выбрать несколько физических величин, условно приняв их не зависящими друг от друга, а также от других величин, то остальные величины одного или нескольких разделов физики могут быть



выражены через эти произвольно выбранные величины. Так, например, выбрав в качестве независимых величин длину, массу и время, можно все величины механики последовательно выразить через эти три независимые величины, создав таким образом систему физических величин.

● Система физических величин (система величин) — совокупность взаимосвязанных физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются функциями независимых величин [80].

Система физических величин состоит из основных физических величин и производных физических величин.

● Основная физическая величина (основная величина) — физическая величина, входящая в систему величин и условно принятая в качестве не зависящей от других величин этой системы [19].

Выбор физических величин, принимаемых за основные, и их число в принципе произвольны, но практические соображения приводят к некоторому ограничению свободы в выборе основных величин. В качестве основных величин прежде всего были выбраны величины, характеризующие коренные свойства материального мира: длина, масса, время. Остальные четыре основные величины выбраны так, чтобы каждая из них представляла один из разделов физики. Такими величинами стали сила тока, термодинамическая температура, количество вещества, сила света.

Каждой основной физической величине системы величин присваивается символ в виде строчной буквы латинского или греческого алфавитов. Символы эти следующие: длина —  $L$ , масса —  $M$ , время —  $T$ , сила электрического тока —  $I$ , температура —  $\Theta$ , количество вещества —  $N$ , сила света —  $J$ .

Символы эти входят в название системы физических величин. Так, система величин механики, основными величинами которой являются длина, масса и время, называется «система LMT»; система величин, на которой строится Международная система единиц (СИ) и которая имеет семь основных величин, называется «система величин LMTI $\Theta$ NJ».

● Производная физическая величина (производная величина) — физическая величина, входящая в систему величин и определяемая через основные величины этой системы [19].

При построении системы физических величин подбирается такая последовательность определяющих уравнений, в которой каждое последующее уравнение содержит только одну новую производную величину, что позволяет выразить эту величину через совокупность ранее определенных величин, а в конечном счете через основные величины системы величин.

## § 1.8

### РАЗМЕРНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

● Размерность физической величины (размерность величины)<sup>1</sup> — выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные и с коэффициентом пропорциональности, равным единице [19].

\* 1. Понятие «размерность» распространяется и на основные величины. Размерность основной величины в отношении самой себя равна единице и не зависит от других величин, т. е. формула размерности основной величины совпадает с ее символом. Например, размерность длины —  $L$ , размерность массы —  $M$  и т. д.

2. В соответствии с [35] и [80] размерность величины следует обозначать знаком<sup>2</sup>  $\dim$ .

Чтобы найти размерность производной физической величины в некоторой системе величин, надо в правую часть определяющего уравнения этой величины вместо обозначений величин подставить их размерности. Так, например, подставив в определяющее уравнение скорости равномерного движения  $v = ds/dt$  вместо  $ds$  размерность длины  $L$  и вместо  $dt$  размерность времени  $T$ , получим

$$\dim v = L/T = LT^{-1}.$$

Подставив в определяющее уравнение ускорения  $a = dv/dt$  вместо  $dt$  размерность времени  $T$  и вместо  $dv$  найденную выше размерность скорости  $LT^{-1}$ , получим

<sup>1</sup> В физической литературе широко распространена точка зрения, согласно которой понятие размерности относится не к физической величине, а к ее единице. См., например: Л. А. Сена. Единицы физических величин и их размерности. М., 1988.

<sup>2</sup> Следует отметить, что в [64], а также в некоторых учебных пособиях по курсу общей физики для вузов размерность обозначается знаком [ ].



$$\dim a = LT^{-2}.$$

Зная размерность ускорения по определяющему уравнению силы  $F=ma$ , получим

$$\dim F = M \cdot LT^{-2} = LMT^{-2}.$$

Зная размерность силы, можно найти размерность работы, затем размерность мощности и т. д.

Размерность любой производной механической величины в системе величин LMT может быть выражена степенным рядом:

$$\dim x = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma}.$$

Общий вид размерности физической величины в системе величин, построенной на семи основных величинах (длина, масса, время, сила тока, температура, сила света, количество вещества), может быть выражен формулой

$$\dim x = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} J^{\nu} N^{\eta},$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  — показатели размерности физической величины.

Над размерностями можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечения корня. Действия сложения и вычитания размерностей не имеют смысла.

Размерность величины одновременно является размерностью ее единицы.

• Показатель размерности физической величины (показатель размерности) — показатель степени, в которую возведена размерность основной физической величины, входящей в размерность производной физической величины [19].

• Показатели размерности физической величины могут принимать различные значения: целые или дробные, положительные или отрицательные. Некоторые показатели размерности данной производной величины могут оказаться равными нулю.

• Размерная физическая величина (размерная величина)<sup>1</sup> — физическая величина, в размерности которой

хотя бы одна из основных физических величин возведена в степень, не равную нулю [80].

• Безразмерная физическая величина (безразмерная величина) — физическая величина, в размерность которой основные физические величины входят в степени, равной нулю.

Безразмерными величинами являются, например, относительная деформация, коэффициент полезного действия и вообще любая величина, равная отношению двух однородных величин. Безразмерными величинами могут быть также и иные комбинации величин (добротность колебательной системы, критерии подобия и др.) [19].

Можно указать на ряд практических применений понятия «размерность» физической величины.

Во-первых, пользуясь размерностью величины, можно установить, во сколько раз изменится размер единицы данной производной физической величины при изменении размеров единиц величин, принятых за основные.

Рассмотрим некоторую производную механическую величину  $x$ , имеющую размерность

$$\dim x = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma}.$$

Очевидно, что число раз  $n$ , в которое возрастет или уменьшится размер новой единицы  $[x]'$  по сравнению с прежней единицей  $[x]$ , выразится соотношением

$$n = \frac{[x]'}{[x]} = \left( \frac{[l]'}{[l]} \right)^{\alpha} \left( \frac{[m]'}{[m]} \right)^{\beta} \left( \frac{[t]'}{[t]} \right)^{\gamma}, \quad (1.6)$$

где  $[l], [m], [t]$  — прежние единицы длины, массы и времени соответственно,  $[l]', [m]', [t]'$  — новые единицы тех же величин.

\* Определим по формуле (1.6), во сколько раз возрастет единица энергии, если единицу длины  $[l] = 1$  см заменить единицей  $[l]' = 1$  м, единицу массы  $[m] = 1$  г заменить единицей  $[m]' = 1$  кг, а единицу времени оставить без изменений, т. е.  $[t]' = [t] = 1$  с (такая замена основных единиц соответствует переходу от единиц системы СГС к единицам Международной системы единиц).

Так как размерность энергии в системе СГС и СИ одинакова и выражается соотношением

$$\dim E = L^2 MT^{-2},$$

то для энергии  $E$  формула (1.6) примет вид

$$n = \frac{[E]'}{[E]} = \left( \frac{[l]'}{[l]} \right)^2 \left( \frac{[m]'}{[m]} \right) \left( \frac{[t]'}{[t]} \right)^{-2}. \quad (1.7)$$

<sup>1</sup> В [80] к этому термину сделано примечание: с точки зрения норм русского языка, этот термин правильнее называть «размерностная величина». Аналогичное примечание сделано к термину «безразмерная величина».



При переходе от единиц СГС к единицам СИ единица длины возрастает в  $10^2$  раз ( $1 \text{ м} = 100 \text{ см}$ ), единица массы возрастет в  $10^3$  раза ( $1 \text{ кг} = 1000 \text{ г}$ ), а единица времени останется прежней. Поэтому по формуле (1.7) найдем

$$n = \frac{[E]'}{[E]} = \left( \frac{10^2 \text{ см}}{1 \text{ см}} \right)^2 \left( \frac{10^3 \text{ г}}{1 \text{ г}} \right) \left( \frac{1 \text{ с}}{1 \text{ с}} \right)^{-2} = 10^4 \cdot 10^3 \cdot 1 = 10^7.$$

Следовательно, при переходе от системы СГС к СИ единица энергии возрастет в  $10^7$  раз.

Во-вторых, с помощью размерностей физических величин проверяют правильность уравнений, полученных в ходе теоретических выводов. При этом опираются на следующее требование, предъявляемое к любому физическому равенству: размерности правой и левой частей равенства, связывающего различные физические величины, должны быть одинаковыми.

Если при проверке выяснится, что эти размерности не одинаковы, то это значит, что в процессе вывода была допущена ошибка или в уравнение входит неучтенный размерный коэффициент.

В-третьих, на основе размерностей физических величин разработан метод установления функциональных связей между физическими величинами (анализ размерностей).

Если известны физические величины (включая размерные параметры), характеризующие некоторый процесс, то методом сравнения размерностей можно с точностью до безразмерного множителя найти уравнение, показывающее связь этих величин между собой.

Пусть некоторая величина  $y$  является функцией величин  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1.8)$$

Согласно изложенному выше требованию равенства размерностей левой и правой частей физических уравнений, можно записать

$$\dim y = \dim f.$$

Решая это уравнение, можно получить необходимые данные для определения вида функции (1.8).

\* Пусть требуется установить зависимость периода колебаний математического маятника от величин, характеризующих этот маятник.

Маятник характеризуется двумя величинами: массой  $m$  и длиной  $l$ . Колебания маятника совершаются под действием силы тяжести  $P$ . Следовательно, период колебаний может зависеть только от этих трех величин, т. е. является функцией вида

$$\tau = f(l, m, P).$$

Предположим, что в этой функции величины  $l, m, P$  входят с показателями степени  $\alpha, \beta, \gamma$  соответственно, т. е. сама функция имеет вид

$$\tau = Cl^\alpha m^\beta P^\gamma, \quad (1.9)$$

где  $C$  — некоторая постоянная.

Запишем условие равенства размерностей левой и правой частей равенства (1.9):

$$\dim \tau = \dim (l^\alpha m^\beta P^\gamma).$$

Так как  $\dim l = L$ ,  $\dim m = M$ ,  $\dim P = LMT^{-2}$ ,  $\dim \tau = T$ , то

$$T = L^\alpha M^\beta (LMT^{-2})^\gamma$$

или

$$T = L^{\alpha+\gamma} M^{\beta+\gamma} T^{-2\gamma}.$$

Сравнивая соответствующие показатели размерностей левой и правой частей этого равенства, получаем систему уравнений:

$$\alpha + \gamma = 0, \quad \beta + \gamma = 0, \quad -2\gamma = 1.$$

Решив эту систему уравнений, найдем:

$$\alpha = -\frac{1}{2}, \quad \beta = -\frac{1}{2}, \quad \gamma = \frac{1}{2}.$$

Подставив найденные значения показателей размерности в (1.9), получим

$$\tau = Cl^{1/2} m^{1/2} P^{1/2} = C \sqrt{\frac{lm}{P}}.$$

Так как сила тяжести  $P = mg$ , то

$$\tau = C \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.10)$$

Постоянная  $C$  зависит от начального угла отклонения маятника от положения равновесия и не может быть определена методом, использованным для получения формулы (1.10). Как указано выше, зависимость между физическими величинами с помощью анализа размерностей определяется только с точностью до безразмерной постоянной. В этом смысле метод анализа размерностей не является универсальным.

Как известно из курса физики, при малых углах отклонения математического маятника постоянная  $C = 2\pi$ , а формула (1.10) в этом случае имеет вид

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.11)$$

Более подробное рассмотрение метода анализа размерностей не входит в задачу этого пособия<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Интересующимся этим вопросом рекомендуем кн.: Л. А. Сена. Единицы физических величин и их размерности. М., 1988.



## СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

● Система единиц физических величин (система единиц) — совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами для заданной системы физических величин [80].

● Основная единица системы единиц (основная единица) — единица основной физической величины в данной системе единиц [80].

● Дополнительная единица системы единиц (дополнительная единица). До введения Международной системы единиц СИ это понятие в физике не применялось. В СИ единицы плоского — радиан — и телесного —стерадиан — углов выделены в отдельную группу дополнительных единиц, хотя определения, что понимается под дополнительными величинами и соответственно единицами, не дано [80] (см. также с. 45).

● Производная единица системы (производная единица) — единица производной физической величины системы единиц, образованная в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными единицами или же с основными и уже определенными производными [19].

● Системная единица физической величины (системная единица) — единица физической величины, входящая в одну из принятых систем единиц [80].

Основные, производные, кратные и дольные единицы СИ являются системными, например 1 м; 1 с; 1 м/с; 1 км; 1 Н.

● Когерентная производная единица физической величины (когерентная единица) — производная единица физической величины, связанная с другими единицами системы единиц уравнением, в котором числовой коэффициент принят равным 1 [19].

● Когерентная система единиц физических величин (когерентная система единиц) — система единиц физических величин, состоящая из основных единиц и когерентных производных единиц [80].

\* Кратные и дольные единицы от системных единиц не входят в когерентную систему.

● Кратная единица физической величины (кратная единица) — единица физической величины, в целое

число раз большая системной или внесистемной единицы [19].

● Дольная единица физической величины (дольная единица) — единица физической величины, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы [19].

● Размер единицы физической величины (размер единицы) — количественная определенность единицы физической величины, воспроизводимой или хранимой средством измерений [80].

Размер основных единиц Международной системы единиц (СИ) устанавливается определением этих единиц Генеральными конференциями по мерам и весам.

## Системы единиц, применявшиеся до введения Международной системы

● Метрическая система мер — совокупность единиц физических величин, в основу которой положены две единицы: метр — единица длины, килограмм — единица массы<sup>1</sup>. Единицы площади и объема (вместимости) образованы как производные от метра. Отличительной особенностью Метрической системы мер явился принцип десятичных соотношений при образовании кратных и дольных единиц.

Метрическая система мер, введенная первоначально во Франции, получила во второй половине XIX в. международное признание.

Однако метрическая система не является системой единиц в том смысле, какой придают этому понятию в настоящее время. В Метрическую систему мер входят единицы весьма ограниченного числа величин — длины, массы, времени, площади, объема (вместимости).

● Система Гаусса. Впервые понятие системы единиц физических величин было введено немецким математиком К. Гауссом (1832). Идея Гаусса состояла в следующем. Сначала выбирается несколько величин, независимых друг от друга. Величины эти называют основными, а их единицы — основными единицами системы единиц. Основные величины

<sup>1</sup> Первоначально килограмм был введен как единица веса, а не массы.



выбираются так, чтобы, пользуясь формулами, выражающими связь между физическими величинами, можно было образовать единицы других величин. Единицы, полученные с помощью формул и выраженные через основные единицы, Гаусс назвал производными единицами.

Пользуясь своей идеей, Гаусс построил систему единиц магнитных величин. Основными единицами этой системы были выбраны: миллиметр — единица длины, миллиграмм — единица массы, секунда — единица времени.

Хотя система Гаусса не получила широкого распространения из-за малого размера основных единиц, идеи Гаусса оказались весьма плодотворными. Все последующие системы единиц строились на предложенных им принципах.

- Система СГС. Система СГС построена на основе системы величин LMT. Основные единицы системы СГС: сантиметр — единица длины, грамм — единица массы, секунда — единица времени.

В системе СГС с использованием указанных трех основных единиц установлены производные единицы механических и акустических величин. С использованием единицы термодинамической температуры — кельвина — и единицы силы света — канделы — система СГС распространяется на область тепловых и оптических величин.

- Система МКС. Основные единицы системы МКС: метр — единица длины, килограмм — единица массы, секунда — единица времени. Так же как и система СГС, система МКС построена на основе системы величин LMT. Эта система единиц была предложена в 1901 г. итальянским инженером Джорджи и содержала кроме основных производные единицы механических и акустических величин. Путем добавления в качестве основных единицы термодинамической температуры — кельвина — и силы света — канделы — систему МКС можно было распространить на область тепловых и световых величин.

- Система МТС. Система единиц МТС построена на основе системы величин LMT. Основные единицы системы: метр — единица длины, тонна — единица массы, секунда — единица времени. Система МТС была разработана во Франции и узаконена ее правительством в 1919 г.

Система МТС была принята и в СССР и в соответствии с государственным стандартом применялась более двадцати лет (1933 — 1955).

Единица массы этой системы — тонна — по своему размеру оказалась удобной в ряде отраслей производства, имеющих дело со сравнительно большими массами. Система МТС имела и ряд других преимуществ. Во-первых, числовые значения плотности вещества при выражении ее в системе МТС совпадали с числовыми значениями этой величины при выражении ее в системе СГС (например, в системе СГС плотность железа  $7,8 \text{ г/см}^3$ , в системе МТС —  $7,8 \text{ т/м}^3$ ). Во-вторых, единица работы системы МТС — килоджоуль — имела простое соотношение с единицей работы системы МКС ( $1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж}$ ). Но размеры единиц подавляющего большинства производных величин в этой системе оказались неудобными на практике. В СССР система МТС была отменена в 1955 г.

- Система МКГСС. Система единиц МКГСС построена на основе системы величин LFT. Основные единицы ее: метр — единица длины, килограмм-сила — единица силы, секунда — единица времени.

Килограмм-сила — сила, равная весу тела массой  $1 \text{ кг}$  при нормальном ускорении свободного падения  $g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2$ . Эта единица силы, а также некоторые производные единицы системы МКГСС оказались удобными при применении их в технике. Поэтому система получила широкое распространение в механике, теплотехнике и ряде других отраслей производства.

Основной недостаток системы МКГСС — весьма ограниченные ее возможности применения в физике. Существенным недостатком системы МКГСС является также то, что единица массы в этой системе не имеет простого десятичного соотношения с единицами массы других систем ( $1 \text{ т. е. м.} = 9,81 \text{ кг}$ ).

С введением Международной системы единиц система МКГСС утратила свое значение.

- Системы единиц электромагнитных величин. Известны два способа построения систем электрических и магнитных величин на основе системы СГС: на трех основных единицах (сантиметр, грамм, секунда) и на четырех основных единицах (сантиметр, грамм, секунда и одна единица электрической или магнитной величины).



Первым способом, т. е. с использованием трех основных единиц на основе системы СГС, получены три системы единиц: электростатическая система единиц (система СГСЭ), электромагнитная система единиц (система СГСМ), Симметричная система единиц (система СГС). Рассмотрим эти системы.

- *Электростатическая система единиц (система СГСЭ).* При построении этой системы первой производной электрической единицей вводится единица электрического заряда с использованием закона Кулона в качестве определяющего уравнения. При этом абсолютная диэлектрическая проницаемость рассматривается безразмерной электрической величиной. Как следствие этого, в некоторых уравнениях, связывающих электромагнитные величины, появляется в явном виде корень квадратный из скорости света в вакууме.

- *Электромагнитная система единиц (система СГСМ).* При построении этой системы первой производной электрической единицей вводится единица силы тока с использованием закона Ампера в качестве определяющего уравнения. При этом абсолютная магнитная проницаемость рассматривается безразмерной величиной. В связи с этим в некоторых уравнениях, связывающих электромагнитные величины, появляется в явном виде корень квадратный из скорости света в вакууме.

- *Симметричная система единиц (система СГС).* Эта система является совокупностью систем СГСЭ и СГСМ. В системе СГС в качестве единиц электрических величин используются единицы системы СГСЭ, а в качестве единиц магнитных величин — единицы системы СГСМ. В результате комбинации двух систем в некоторых уравнениях, связывающих электрические и магнитные величины, появляется в явном виде скорость света в вакууме.

- *Практическая система электрических единиц.* Учитывая, что электрические единицы системы СГС по размеру оказались неудобными на практике, I Международным конгрессом электриков (1881) были приняты следующие практические электрические единицы:

$$1 \text{ ом} = 10^9 \text{ единиц сопротивления системы СГС}$$

$$1 \text{ вольт} = 10^8 \text{ единиц электродвижущей силы системы СГСМ}$$

$$1 \text{ ампер} = 0,1 \text{ единицы силы тока системы СГСМ}$$

$$1 \text{ фарад} = 10^9 \text{ единиц электрической емкости системы СГСМ}$$

Позднее (1889) список практических единиц был пополнен единицами:

$$1 \text{ джоуль} = 10^7 \text{ эрг}$$

$$1 \text{ ватт} = 10^7 \text{ эрг/с}$$

$$1 \text{ генри} = 10^9 \text{ единиц индуктивности системы СГСМ}$$

Совокупность этих единиц получила название *Практической системы электрических единиц*. В дальнейшем Практическая система электрических единиц сыграла существенную роль. Ее единицы вошли в систему МКСА, а вместе с ней в Международную систему единиц.

- *Система МКСА.* Одним из преимуществ системы механических единиц МКС являлось то, что она без особых трудностей могла быть связана с единицами Практической системы электрических единиц. Единицы работы (джоуль) и мощности (ватт) практической системы электрических единиц совпали по размеру с соответствующими единицами системы МКС. Это позволило на основе системы МКС создать когерентную систему механических и электрических единиц, добавив к трем основным единицам системы — метру, килограмму, секунде — одну электрическую единицу из числа единиц Практической системы электрических единиц. Четвертой основной единицей была выбрана единица силы тока — ампер. Так возникла система когерентных электрических единиц — система МКСА.

Система МКСА получила широкое распространение в электротехнике и при создании Международной системы единиц вошла в нее как составная часть. Отметим, что система МКСА применяется в рационализованном виде (см. с. 136).

### Естественные системы единиц

- Естественными системами единиц называют системы, в которых за основные единицы приняты фундаментальные физические постоянные, такие, например, как элементарный электрический заряд (заряд протона)  $e$ , масса электрона  $m_e$ , постоянная Планка  $h$  и  $\hbar$ , скорость света в вакууме  $c$ , гравитационная постоянная  $G$ , постоянная Больцмана  $k$ .

Таким образом, в отличие от всех других систем единиц, в которых выбор основных единиц обусловлен требованиями практики измерений,



в естественных системах размер основных единиц определяется явлениями природы.

Впервые естественную систему единиц предложил М. Планк (1906), выбрав в качестве основных единиц постоянную Планка  $h$ , скорость света  $c$ , гравитационную постоянную  $G$ , постоянную Больцмана  $k$ .

При построении естественных систем единиц фундаментальные постоянные, выбранные в качестве основных единиц, формально полагаются равными безразмерной единице. С учетом этого естественную систему единиц Планка можно характеризовать соотношением  $h=c=G=k=1$ .

Кроме системы Планка известны:

- система Хартри, называемая также системой атомных единиц, характеризуемая соотношением  $e=m_e=\hbar=1$ ;
- релятивистская система единиц, используемая в квантовой электродинамике и характеризуемая соотношением  $c=m_e=\hbar=1$ .

Удобство введенных естественных систем единиц состоит в том, что параметры атомных объектов в этих системах по размеру не сильно отличаются от единицы и в то же время упрощаются основные уравнения теории.

Производные величины в естественных системах единиц являются комбинациями из основных величин. При этом оказывается, что с заданной размерностью из основных величин можно получить только одну комбинацию, которая и образует производную величину с заданной размерностью.

Например, время в системе Хартри является следующей комбинацией основных величин этой системы:

$$t = \frac{\hbar^3}{m_e c^4}. \quad (1.12)$$

Убедимся в том, что правая часть формулы (1.12) действительно имеет размерность времени. Для этого подставим в эту формулу вместо  $\hbar$ ,  $m_e$  и  $c$  их размерности в системе СГС (при этом учтем, что постоянная Планка есть элементарный квант действия, т. е. выражает величину, равную произведению энергии  $\epsilon$  на время  $t$ ):

$$\begin{aligned} \dim t &= \frac{\dim \hbar^3}{\dim m_e \dim c^4} = \frac{\dim \epsilon^3 \dim t^3}{\dim m_e \dim c^4} = \\ &= \frac{(L^2 M T^{-2})^3 T^3}{M (L^{3/2} M^{1/2} T^{-1})^4} = \frac{L^6 M^3 T^{-3}}{L^6 M^3 T^{-4}} = T, \end{aligned}$$

т. е., действительно, комбинация основных величин системы Хартри, приведенных в (1.12), имеет размерность времени.

Если теперь подставить в (1.12) значения  $\hbar$ ,  $m_e$  и  $c$ , выраженные в системе СГС, то найдем значение единицы времени в системе Хартри:

$$[t] = 2,42 \cdot 10^{-17} \text{ с.}$$

Аналогично можно получить и другие единицы системы атомных единиц.

Определяющие уравнения физических величин и их единиц в системах Хартри и системе релятивистских единиц см. в табл. 7.

Естественные системы единиц находят применение в некоторых разделах теоретической физики.

## Международная система единиц

- Международная система единиц<sup>1</sup> построена на основе системы величин LMTIΘJN. Основными единицами СИ являются:

метр (м) — единица длины  
килограмм (кг) — единица массы  
секунда (с) — единица времени  
ампер (А) — единица силы тока  
кельвин (К) — единица термодинамической температуры  
кандела (кд) — единица силы света  
моль (моль) — единица количества вещества

Международная система имеет несомненные преимущества по сравнению со всеми существовавшими до нее системами единиц. Она является универсальной, т. е. охватывает все области измерений. Семь ее основных единиц позволяют образовывать единицы для любых физических величин во всех областях науки и отраслях техники. Международная система является когерентной системой, что позволяет максимально

<sup>1</sup> Решение о введении Международной системы единиц было принято XI Генеральной конференцией по мерам и весам (1960). Международное сокращенное наименование «SI» (в русской транскрипции «СИ»).



упростить расчетные формулы за счет освобождения их от переводных коэффициентов.

Как основные, так и подавляющее большинство производных единиц СИ по своему размеру удобны для практического их применения. Многие производные единицы Международной системы (ватт, ампер, вольт, ом и др.) задолго до ее введения нашли широкое распространение.

Благодаря своим достоинствам Международная система единиц завоевала всеобщее признание.

Ниже, в гл. 2—10, для всех производных величин на основе их определяющих уравнений получены размерности и единицы СИ и даны рекомендованные [53] и [54] определения этих единиц.

### § 1.10

#### ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

• Внесистемными единицами называются единицы физических величин, которые не входят в системы единиц ни как основные, ни как производные.

К числу внесистемных единиц относятся:

— единицы величин, характеризующих отношение двух одноименных физических величин (процент, промилле, миллионная доля, бел, децибел);

— единицы различного происхождения, находящиеся в десятичном отношении к единицам СИ: единицы массы (тонна, центнер), единица площади — гектар, единица вместимости — литр;

— кратные, но не десятичные единицы времени (минута, час, сутки), и тесно связанные с ними единица скорости — километр в час, единица энергии — киловатт-час, единица электрического заряда — ампер-час;

— применяемые в навигации единица длины — морская миля, и единица скорости — узел;

— единица плоского угла — полный угол, минута, секунда;

— применяемые в астрономии единицы длины — астрономическая единица длины, световой год, парсек;

— единицы давления — миллиметр ртутного столба, миллиметр водяного столба, техническая атмосфера, бар;

— единица количества теплоты — калория;

— единица мощности — лошадиная сила;

— единицы величин, характеризующие ионизирующие излучения: доза излучения — рад, эквивалентная доза излучения — бар, экспозиционная доза излучения — рентген, активность нуклида в радиоактивном источнике — кюри — и многие другие единицы различных физических величин.

Учитывая, что отдельные внесистемные единицы по своим размерам оказываются очень удобными для ряда областей науки и отраслей техники, а также для применения в быту и получили широкое распространение ГОСТ 8.417—81 «Единицы физических величин», некоторые внесистемные единицы на определенных условиях допущены к применению — одни наравне с единицами СИ, другие — временно до принятия по ним международных решений, третьи — только в некоторых областях науки и техники (см. § 1.11).

Соотношения внесистемных единиц с единицами СИ читатель найдет в табл. 11.

### § 1.11

#### НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СССР ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

##### ГОСТ 8.417—81

##### «ГСИ. Единицы физических величин (СТ СЭВ 1052—78)»

Этим стандартом установлено:

1. Подлежат обязательному применению единицы Международной системы единиц, а также десятичные кратные и дольные от них.

2. Допускается применять наравне с единицами СИ без ограничения срока внесистемные единицы, приведенные в табл. 2, а также некоторые, нашедшие широкое применение на практике десятичные кратные и дольные от них.

3. Без ограничения срока допускается применять относительные и логарифмические единицы, перечисленные в табл. 3.

4. Временно допускается применять наравне с единицами СИ единицы, приведенные в табл. 4, до



принятия по ним соответствующих международных решений. Допускается также применять некоторые, получившие распространение на практике кратные и дольные от них, сочетания этих единиц с единицами СИ, десятичными кратными и дольными от них.

5. В печатных изданиях допускается применять либо международные, либо русские обозначения единиц. Одновременное применение обоих видов обозначений в одном и том же издании не допускается, за исключением публикаций по единицам физических величин.

6. Стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикации их результатов, если в них не используют результаты измерения конкретных физических величин, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам<sup>1</sup>.

В ГОСТ 8.417—81 также установлены «Правила образования когерентных производных единиц СИ» (см. Приложение 1), «Правила образования десятичных кратных и дольных единиц, а также их наименований и обозначений» (см. Приложение 2) и «Правила написания обозначений единиц» (см. Приложение 3).

**Методические указания РД 50-160—79**  
**Внедрение и применение СТ СЭВ 10-52—78**  
**«Метрология. Единицы физических величин»**

Этим нормативным документом:

1) установлен порядок внедрения и применения СТ СЭВ 1052—78 в СССР;

2) приведены производные единицы СИ по разделам физики и даны их определения;

3) введены правила написания наименований единиц;

4) даны рекомендации:

а) по пересчету коэффициентов в формулах при переходе к единицам СИ;

б) по применению терминологии физических величин.

<sup>1</sup> Под условными шкалами понимаются, например, шкалы твердости Роквелла и Виккерса, светочувствительности материалов.

**Методические указания РД 50-454—84**  
**Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81**  
**«ГСИ. Единицы физических величин» в области**  
**ионизирующих излучений**

Этим нормативным документом:

1) установлен порядок внедрения ГОСТ 8.417—81 в области ионизирующих излучений;

2) приведены рекомендуемые термины, обозначения и определения производных величин, характеризующих ионизирующие излучения;

3) даны рекомендации по выбору дольных и кратных единиц СИ, а также внесистемных единиц в области активности радионуклидов, в дозиметрии при контроле радиоактивной безопасности и терапевтическом использовании ионизирующих излучений, технологической дозиметрии и радиационных испытаний.

**Методические указания МИ 221—81**  
**Методика внедрения СТ СЭВ 1052—78**  
**«Метрология. Единицы физических величин» в**  
**областях измерений давления, силы и теплофизических**  
**измерений**

Этим нормативным документом:

1) установлен порядок перехода на Международную систему единиц в областях измерений силы, давления и теплофизических величин;

2) установлен порядок приведения в соответствие с СТ СЭВ 1052—78 средств измерений силы давления и теплофизических величин и переградуировки измерительных приборов.



## Глава 2

### ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

#### § 2.1

#### ПРОСТРАНСТВО

• Пространство и время — категории, обозначающие основные формы материи. Пространство выражает порядок сосуществования отдельных объектов, время — порядок смены явлений [72].

• Длина  $l$ ,  $L$  — величина, характеризующая протяженность, удаленность и перемещение тел или их частей вдоль заданной линии.

Длина является основной величиной Международной системы единиц, поэтому ее размерность и единица, как и всех остальных основных величин СИ, выбраны произвольно:

$$\dim l = L, [l] = 1 \text{ м (метр)}.$$

• *Метр* — длина пути, проходимого в вакууме светом за  $1/299\,792\,458$  секунды.

Такое определение получила единица длины — метр — на XVII Генеральной конференции по мерам и весам (1983).

К этому определению мы еще вернемся. А сейчас проследим путь, который был пройден, прежде чем стало возможным современное определение метра.

Впервые слово «метр» как наименование единицы длины упоминается Титом Буратиной в книге «Универсальная мера» (1675). За единицу длины — метр — он предложил принять длину секундного маятника. Но предложение определить метр как длину секундного маятника не было принято по той причине, что длина секундного маятника не постоянна. Она зависит от географической широты места наблюдения, или, точнее, от ускорения свободного падения тел, которое в разных точках земной поверхности имеет различные значения.

В 1791 г. комиссия, созданная Национальным собранием Франции (Лаплас, Лагранж, Борда,

Монж), предложила в качестве единицы длины — метра — принять длину, равную одной десятиллионной части четверти длины земного меридиана. В марте 1791 г. это решение комиссии было узаконено Национальным собранием Франции. В 1791 г. французскими учеными было начато измерение дуги меридиана Земли

от Дюнкерка до Барселоны. После завершения этих работ был изготовлен платиновый прототип (эталон) метра в виде концевой меры. Он представлял собой линейку шириной 25 мм, толщиной около 4 мм с расстоянием между концами (отсюда название «концевая мера»), равным 1 м. По месту своего хранения (Национальный архив Франции) этот эталон метра впоследствии получил название «архивный метр».

Позднее выяснилось, что при повторных измерениях длины дуги меридиана метр не может быть точно воспроизведен из-за неизбежных ошибок, допускаемых при измерениях, а также из-за отсутствия точных данных о фигуре Земли. Поэтому пришлось отказаться от «естественного» эталона метра и принять в качестве исходной меры длины «архивный метр». По нему был изготовлен 31 эталон из платиноиридиевого сплава. Один из них (эталон № 6), как наиболее точно воспроизводивший «архивный метр», по постановлению Генеральной конференции по мерам и весам (1889) был утвержден в качестве Международного прототипа метра. Этот эталон представляет собой стержень длиной 102 см. Поперечное сечение его изображено на рис. 2.1, а (размеры указаны в миллиметрах). На обоих концах стержня на специально отполированных участках нанесены по три поперечных и два продольных штриха (рис. 2.1, б). Расстояние между осями средних поперечных штрихов было принято за 1 м.

Определение метра с помощью штрихового эталона неудовлетворительно в двух отношениях. Во-

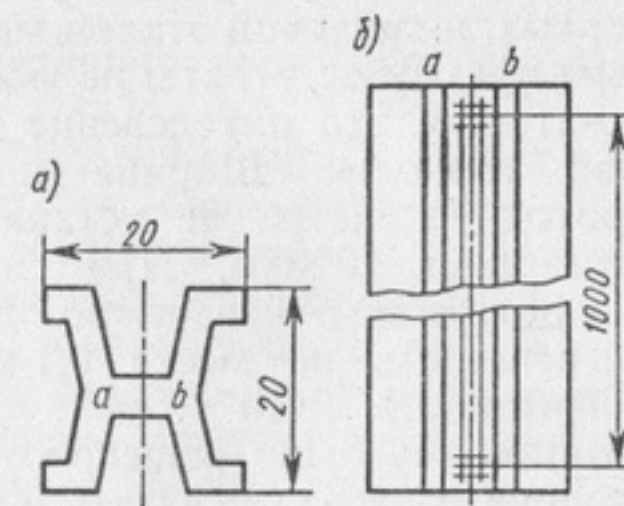


Рис. 2.1. «Архивный» метр:  
а — поперечное сечение; б — вид сверху



первых, штриховой эталон метра является искусственным и в случае утраты не может быть воспроизведен. Во-вторых, это определение не обеспечило необходимой точности. Ширина штрихов, нанесенных на прототипе метра и устанавливающих его длину, составляет 10 мкм. При сличении эталонов метра с прототипом неизбежно допускалась абсолютная погрешность не менее 0,1 мкм или относительная погрешность  $1 \cdot 10^{-7}$ .

Поэтому было решено отказаться от штрихового эталона метра и связать единицу длины с какой-нибудь «естественной» мерой, взятой из природы. Удобной для этих целей оказалась длина электромагнитной волны.

Известно, что излучения раскаленных паров и газов дают линейчатые спектры. Каждая линия спектра данного газа соответствует переходу электрона в атоме с одного энергетического уровня на другой, или, говоря точнее, переходу атома из одного стационарного состояния в другое. Если энергия атома в первом состоянии  $E_1$ , а во втором  $E_2$ , причем  $E_1 > E_2$ , то при переходе из первого состояния во второе атом излучает фотон, частота  $\nu$  и длина волны  $\lambda$  которого определяются из соотношения

$$\nu = c\lambda = (E_1 - E_2)/h,$$

где  $c$  — скорость электромагнитных волн в вакууме,  $h$  — постоянная Планка.

Длины волн спектральных линий подчиняются строгим закономерностям и при определенных условиях излучения остаются постоянными. Поэтому длина волны, соответствующая какой-нибудь спектральной линии, или некоторое число этих длин волн может быть принято за естественный эталон длины.

Но спектральные линии в линейчатых спектрах не являются строго монохроматическими, т. е. каждая линия содержит не одну длину волны  $\lambda$ , а некоторый интервал длин волн  $\Delta\lambda$  вблизи длины волны  $\lambda$ . Иначе говоря, каждая спектральная линия обладает некоторой шириной. Ширина линий различна не только в спектрах разных элементов, но и в пределах данного спектра. Ясно, что чем меньше интервал  $\Delta\lambda$  спектральной линии, чем она уже, тем точнее можно определить длину волны данной линии. Поэтому в качестве эталона длины выгоднее брать

длину волны, соответствующую узкой спектральной линии.

Ширина данной спектральной линии может меняться в зависимости от условий излучения. Эта зависимость для разных линий также различна. Ясно, что чем меньше меняется ширина линии от внешних условий, тем точнее можно определить длину ее волны. Поэтому в качестве эталона длины выгоднее брать длину волны, соответствующую такой линии, ширина которой более стабильна.

Из сказанного вытекает, что в качестве эталона длины следует выбрать излучение такого элемента, в спектре которого имеется наиболее узкая линия, отличающаяся в то же время максимально возможным постоянством ширины. В результате многочисленных исследований было найдено, что наилучшим образом этим двум требованиям удовлетворяет оранжевая линия в спектре криптона-86, которая соответствует переходу между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$ . В связи с этим метр получил определение:

Метр равен 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$  атома криптона-86 [XI ГКМВ (1960), Резолюция 6].

Воспроизведение метра на основе сравнения его с длиной волны света осуществляется посредством криптонового эталона единицы длины<sup>1</sup>.

Криптоновый эталон по сравнению со штриховым повышает точность воспроизведения метра на один порядок (примерно в 10 раз).

Единица длины с помощью криптонового эталона воспроизводилась с относительной погрешностью  $3 \cdot 10^{-8}$ . И погрешность эта не могла быть существенно понижена. Поэтому для дальнейшего повышения точности воспроизведения единицы длины необходимы были другие источники излучений, обладающие большей степенью когерентности, чем излучения криптоновой лампы. Такими источниками являются лазеры. Усилиями ученых многих стран, в том числе Советского Союза, на основе лазерной техники был создан единый эталон частоты — времени — длины, который позволяет определять эти величины с более

<sup>1</sup> Описание криптонового эталона метра см. в [31].



высокой точностью. В частности, единица длины — метр — определяется с относительной погрешностью, не превышающей  $10^{-10}$ . В результате создания единого эталона частоты — времени — длины скорость света была постулирована точно равной 299 792 458 м/с, а единица длины — метр — получила приведенное в начале этого параграфа определение.

Расчеты при определении единицы длины базировались на соотношении  $c = \lambda \nu$ , связывающем пространство и время, где  $c$  — скорость света в вакууме, м/с;  $\lambda$  — длина волны излучения, м;  $\nu$  — частота излучений,  $\text{с}^{-1}$ .

Рекомендуемые кратные и дольные единицы, образованные от метра<sup>1</sup>, — км, см, мм, мкм, нм.

Наравне с единицами СИ допущены к применению следующие внесистемные единицы длины:

астрономическая единица (а. е.)	1 а. е. = $1,49598 \cdot 10^{11}$ м
световой год (св. год)	св. год = $9,46053 \cdot 10^{15}$ м
парсек (пк)	1 ПК = $3,0857 \cdot 10^{16}$ м

\* 1. *Астрономическая единица* — расстояние, равное длине радиуса равномерной круговой орбиты тела с пренебрежимо малой массой, движущегося вокруг Солнца с звездной круговой скоростью 0,017202098950 радиан в сутки (86 400 эфемеридных секунд). В системе астрономических констант Международного астрономического союза значение, принятое для астрономической единицы, 1 а. е. =  $149\,600 \cdot 10^6$  м.

*Парсек* — расстояние, при котором одна астрономическая единица стягивает угол в 1 с дуги; 1 ПК = 206 265 а. е.

*Световой год* есть расстояние, которое электромагнитные волны проходят в один год в свободном пространстве.

2. Единицы длины — астрономическую единицу, световой год — не допускается применять с приставками.

Временно допущена к применению в морской навигации до принятия соответствующего международного решения *морская миля* (миля); 1 миля = 1852 м (точно) [Международная конференция по гидрографии (1929)].

● *Площадь*<sup>2</sup>  $A$ ,  $S$  — одна из количественных характеристик плоских фигур и поверхностей. В простейших случаях измеряется числом заполняющих плоскую фигуру единичных квадратов со стороной, равной единице длины [72].

По формуле

$$S = a^2,$$

<sup>1</sup> Здесь и далее приводятся обозначения рекомендуемых кратных и дольных единиц СИ, установленных [16].

<sup>2</sup> Для элемента площади иногда применяется обозначение  $d\sigma$ .

где  $a$  — длина стороны квадрата, найдем размерность и единицу площади:

$$\dim S = L^2, [S] = 1 \text{ м}^2.$$

*Квадратный метр* равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы площади:  $\text{км}^2$ ,  $\text{дм}^2$ ,  $\text{см}^2$ ,  $\text{мм}^2$ .

Допускается к применению наравне с единицами СИ внесистемная единица гектар (га); 1 га =  $10^4 \text{ м}^2$ .

● *Объем*<sup>1</sup>  $V$  — одна из количественных характеристик геометрии тел. В простейших случаях измеряется числом уместающихся в теле единичных кубов, т. е. кубов с ребром, равным единице длины.

Размерность и единицу объема найдем по формуле

$$V = a^3,$$

где  $a$  — длина ребра куба. Тогда

$$\dim V = L^3, [V] = 1 \text{ м}^3.$$

*Кубический метр* равен объему куба с ребрами, длины которых 1 м. Рекомендуемые кратные и дольные единицы объема:  $\text{дм}^3$ ,  $\text{см}^3$ ,  $\text{мм}^3$ .

● *Вместимость* (нрк. *емкость*) сосуда  $V$  — объем внутреннего пространства сосуда<sup>2</sup>.

Кроме единицы СИ — кубического метра — для выражения вместимости сосуда допущена к применению внесистемная единица литр (л).

Рекомендуемые кратные и дольные единицы литра: гл, дл, сл, мл.

\* 1. По определению, 1 л =  $1 \text{ дм}^3$  [ГКМВ (1964)]. Согласно старому определению, 1 л =  $1,000028 \text{ дм}^3$ .

2. Не рекомендуется применять литр при точных измерениях.

3. При возможности смешения международного обозначения литра с цифрой 1 допускается обозначение  $L$ .

● *Плоский угол*  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\vartheta$ ,  $\varphi$  представляет собой участок между двумя линиями, заканчивающимися в одной точке; определяется как отношение длины дуги, вырезанной на окружности (с центром в этой точке), к радиусу окружности (рис. 2.2):

$$\alpha = l/r.$$

<sup>1</sup> Для элемента объема иногда применяют обозначение  $dt$ .

<sup>2</sup> Объем сосуда — объем пространства, ограниченного внешней поверхностью сосуда.



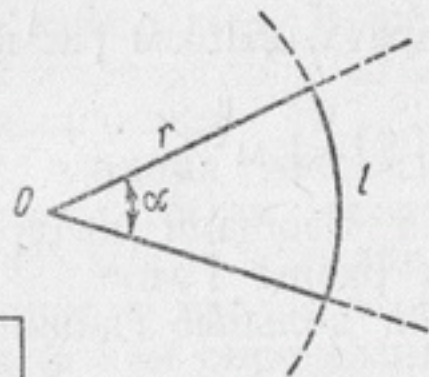


Рис. 2.2. Плоский угол  
Плоский угол как величина, равная отношению двух однородных величин, является безразмерной и выражается в безразмерных единицах (число 1).

Этой безразмерной единице присвоено наименование радиан (рад).

Радиан есть угол между двумя радиусами окружности, которые образуют на окружности дугу, равную по длине радиусу окружности.

Допускаются к применению следующие внесистемные единицы плоского угла:

градус (...°)	1° = 1,74533 · 10 <sup>-2</sup> рад = 60' = 3,6 · 10 <sup>3</sup>
минута (...')	1' = 2,90888 · 10 <sup>-4</sup> рад = 60"
секунда (...")	1" = 4,848137 · 10 <sup>-6</sup> рад
град гон (град)	1 град = (π/200) рад

\* 1. Единицы плоского угла (градус, минуту, секунду) не допускается применять с приставками.

2. См. примечание к телесному углу.

• Телесный угол Ω — участок пространства, вырезанный произвольным конусом и определяемый через отношение площади, вырезанной на сферической поверхности (с центром в вершине этого конуса), к квадрату радиуса этой сферической поверхности (рис. 2.3):

$$\Omega = S/R^2.$$

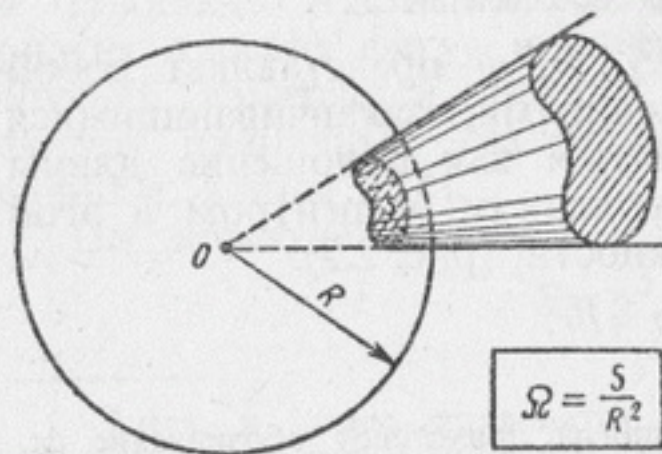


Рис. 2.3. Телесный угол

Размерность и единица телесного угла:

$$\dim \Omega = \frac{\dim S}{\dim R^2} = \frac{L^2}{L^2} = 1,$$

$$[\Omega] = \frac{[S]}{[R^2]} = \frac{1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}^2} = 1.$$

Отсюда следует, что телесный угол как величина, равная отно-

шению двух однородных величин, есть величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах (число 1).

Этой единице присвоено наименованиестерадиан.

Стерadian (ср) — пространственный угол, вершина которого находится в центре сферы и который отсекает площадь поверхности шара, равную площади квадрата, стороны которого имеют длину, равную радиусу сферы.

\* XI Генеральная конференция по мерам и весам (1960) классифицировала единицы СИ радиан истерадиан как «дополнительные единицы», умышленно оставив нерешенным вопрос относительно того, как рассматривать плоский и телесный углы — как основные или как производные величины.

В [35] плоский и телесный угол рассматриваются как производные величины. Они определяются как отношения двух длин и двух площадей соответственно и принимаются за безразмерные величины. При таком определении когерентная единица как плоского, так и телесного угла есть число 1, но разрешается, когда это удобно, пользоваться специальными наименованиями — «радиан» и «стерадиан».

В [80] предлагается отнести единицу плоского угла радиан к основным единицам, а единицу телесного угла стерадиан — к производным единицам системы единиц.

• Кривизна ρ кривой в некоторой ее точке — величина, обратная радиусу кривизны R:

$$\rho = 1/R. \quad (2.1)$$

Кривизна кривой характеризует степень отклонения ее от прямой. В общем случае кривизна кривой в разных ее точках различна, и только кривизна окружности во всех ее точках одна и та же.

• Радиус кривизны R — радиус соприкасающейся окружности (рис. 2.4). Из (2.1) найдем

$$\dim \rho = L^{-1}, \quad [\rho] = 1 \text{ м}^{-1}.$$

Эта единица называется метр в минус первой степени<sup>1</sup>.

Метр в минус первой степени — кривизна кривой в точке, в которой соприкасающаяся окружность имеет радиус, равный 1 м.

<sup>1</sup> В зарубежной литературе широко используется наименование «обратный метр».



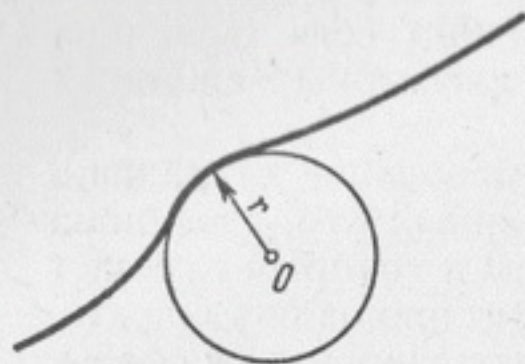


Рис. 2.4. К понятию «кривизна кривой в данной точке»

Проведем плоскость  $P$ , касательную к поверхности (рис. 2.5). Через точку

$M$  касания перпендикулярно этой плоскости расsection поверхность двумя взаимно перпендикулярными плоскостями  $N_1$  и  $N_2$ . На поверхности образуются две пересекающиеся в точке  $M$  кривые:  $A_1MB_1$  и  $A_2MB_2$ .  
• Средней кривизной поверхности в точке  $M$  называется величина

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2},$$

где  $r_1$  и  $\rho_1 = \frac{1}{r_1}$  — радиус кривизны и кривизна первой кривой в точке  $M$ ;  $r_2$  и  $\rho_2 = 1/r_2$  — те же величины второй кривой.

В частном случае, когда поверхность сферическая,

$$r_1 = r_2 = R,$$

где  $R$  — радиус сферы и  $\rho = \rho_1 + \rho_2 = 2/R$ .

Размерность и единица кривизны поверхности:

$$\dim \rho = L^{-1}, [\rho] = 1 \text{ м}^{-1}.$$

## § 2.2

### ВРЕМЯ

• Время  $t$  — величина, характеризующая последовательную смену явлений и состояний материи, длительность их бытия.

Время — основная величина Международной системы.

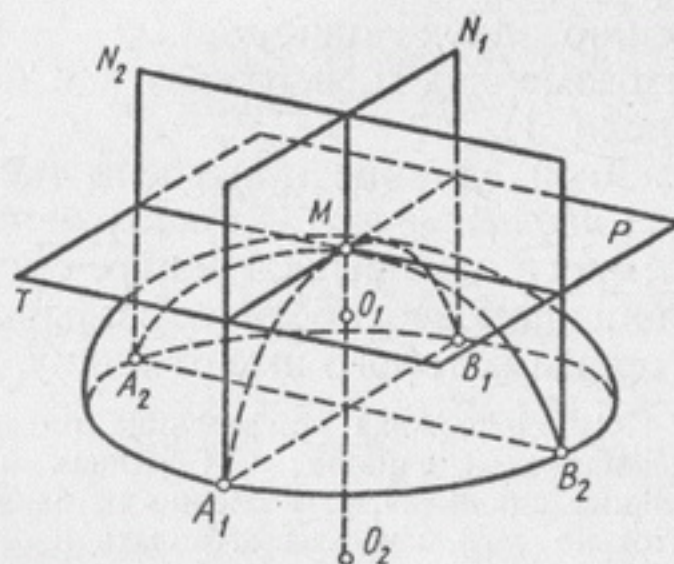


Рис. 2.5. К понятию «кривизна поверхности»

Размерность и единица времени, как и всех основных величин СИ, установлены произвольно:  $\dim t = T$ ,  $[t] = 1 \text{ с}$  (атомная секунда).

• Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967) Резолюция I].

Такое определение секунды в нашей стране и ряде других стран было введено в 1972 г. До этого единица времени — секунда — определялась на основе периода вращения Земли вокруг своей оси и периода обращения Земли вокруг Солнца.

Первоначально секунда была принята за интервал времени, равный  $1/86400$  средних солнечных суток.

• Средними солнечными сутками называется интервал времени между двумя последовательными верхними кульминациями «среднего солнца».

• «Среднее солнце» — это воображаемая точка, которая обходит небесный свод, двигаясь равномерно по небесному экватору за такой же интервал времени, что и истинное Солнце, движущееся неравномерно по эклиптике<sup>1</sup>.

Определение секунды, связанное со средними солнечными сутками, обладает существенным недостатком. Как показали наблюдения, суточное вращение Земли вокруг своей оси, на котором основано определение средних солнечных суток, подвержено колебаниям, закономерности которых пока еще не установлены и учету не поддаются. Известно, что за последнюю треть XIX в. продолжительность суток увеличилась на 0,007 с, а за первую треть XX в. — уменьшилась на 0,005 с. С 1934 г. продолжительность суток увеличивается. Из-за возникшей в связи с этим неточностью в определении секунды пришлось отказаться от эталона единицы времени, связанного с суточным вращением Земли.

По решению Международного комитета мер и весов (1956) в качестве эталона времени был принят тропический год, т. е. промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Солнца через точку весеннего равноденствия. Но так как

<sup>1</sup> Небесным экватором называется линия пересечения плоскости земного экватора с небесной сферой. Эклиптика — линия пересечения плоскости земной орбиты (линии, по которой Земля движется вокруг Солнца) с небесной сферой.



тропический год вообще величина непостоянная (продолжительность его уменьшается на полсекунды за столетие), то в качестве эталона надо было принять продолжительность какого-нибудь года. За такой год был принят 1900 г., начинавшийся для Гринвичского меридиана в полдень 1 января 1900 г.

Исходя из этих соображений на XI Генеральной конференции по мерам и весам (1960) было принято следующее определение:

«Секунда —  $1/31556925,9747$  тропического года для 1900 г. января 0 в 12 часов эфемеридного времени<sup>1</sup>. Размер секунды равен средней продолжительности секунды за последние триста лет».

Относительная погрешность при таком определении секунды составляла  $10^{-7}$ . Такая точность измерений времени не удовлетворяла науку и технику.

В целях дальнейшего повышения точности воспроизведения единицы времени и частоты XII Генеральная конференция по мерам и весам и Международный комитет мер и весов в 1965 г. приняли для временного применения определение секунды, основанное на атомном эталоне частоты. В декларации Международного комитета сказано, что эталон «...представляет собой переход между сверхтонкими уровнями  $F=4$ ,  $M=0$  и  $F=3$ ,  $M=0$  основного состояния  $2S_{1/2}$  атома цезия-133, не возмущенного внешними полями, и что частоте этого перехода приписывается значение  $9\,192\,631\,770$  герц».

Из этого определения эталона следует, что секунда — это время, в течение которого совершается  $9\,192\,631\,770$  переходов между указанными уровнями.

Воспроизведение секунды осуществляется в цезиевом эталоне частоты<sup>2</sup>.

Государственный цезиевый эталон СССР единицы времени (секунды) позволяет определить и воспроизводить секунду с относительной погрешностью, не превышающей  $10^{-11}$ .

<sup>1</sup> Эфемеридное время — это равномерно текущее время, входящее в уравнения динамики небесных тел. Эфемеридами назывались дневники событий при дворе Александра Македонского. Позднее эфемериды — это сборники астрономических сведений, в частности координат небесных светил для ряда последовательных моментов равномерно текущего времени.

<sup>2</sup> С физическими основами действия цезиевого эталона частоты читатель может ознакомиться в [31].

Единый эталон времени — частоты — длины, о котором уже говорилось выше (см. с. 41), позволяет определять единицу времени — секунду — с относительной погрешностью, не превышающей  $10^{-12}$ .

Рекомендуемые кратные и дольные единицы времени: кс, мс, мкс, нс.

Внесистемные единицы времени, допускаемые к применению наравне с единицами СИ:

минута (мин)	1 мин = 60 с
час (ч)	1 ч = 3 600 с
сутки (сут)	1 сут = 86 400 с

Допускается также применять другие единицы времени, получившие широкое распространение, например неделя, месяц<sup>1</sup>, год, век, тысячелетие и т. п.

\* Единицы времени — минуту, час, сутки — не допускается применять с приставками.

### Некоторые понятия, связанные с временем<sup>2</sup>

- Момент события — положение события во времени, аналогичное положению геометрической точки на прямой.
- Интервал времени (нрк. промежуток времени) — время, истекшее между двумя событиями.
- Начальный момент — условное начало отсчета времени.
- Шкала времени — непрерывная последовательность интервалов времени определенной длительности, отсчитываемая от начального момента.
- Эпоха — числовое выражение момента события, указанное в какой-либо шкале времени.
- Дата — особая форма записи эпохи, отличающаяся тем, что отсчет лет, месяцев и суток указывается не с нуля, а с единицы.
- Местное среднее солнечное время — время по шкале, в которой единица времени равна средней солнечной секунде, а начальный момент соответствует нижней кульминации среднего Солнца на меридиане данного места.
- Всемирное время — среднее солнечное время на начальном (Гринвичском) меридиане.

<sup>1</sup> Месяц — интервал времени, близкий к периоду обращения Луны вокруг Земли.

<sup>2</sup> Терминология и определения понятий, связанных с временем, соответствуют [18, 36].



- Атомное время—время по шкале, в которой единица времени равна атомной секунде.
- Национальная шкала атомного времени—шкала атомного времени, воспроизводимая национальным эталоном.
- \* 1. Различия национальных шкал определяются погрешностями воспроизведения размера секунды национальными эталонами и выбором начальных моментов.
- 2. Размер атомной секунды национальной шкалы атомного времени СССР воспроизводится Государственным первичным эталоном времени и частоты.
- Международная шкала атомного времени—шкала атомного времени, воспроизводимая эталоном, составленным из лучших национальных эталонов стран, сотрудничающих с Международным Бюро Времени.
- Часовой пояс— $1/24$  поверхности Земли, ограниченная меридианами, причем нулевой часовой пояс расположен симметрично относительно нулевого (Гринвичского) меридиана.
- \* 1. Нумерация часовых поясов ведется от 0 до 23 с запада на восток.
- 2. В ряде стран, в том числе и в СССР, правительственными постановлениями границы часовых поясов совмещены с административными границами, проходящими вблизи теоретических границ часовых поясов. Поэтому границы часовых поясов не везде проведены точно по меридианам и на географической карте они, как правило, не прямые, а извилистые линии.
- Поясное время—единое время в пределах часового пояса, равное среднему солнечному времени среднего меридиана данного часового пояса.
- \* Поясное время в смежных поясах различается на 1 ч, счет ведется с запада на восток от Гринвичского меридиана.
- Декретное время—поясное время, измененное на целое число часов правительственным распоряжением.
- \* На всей территории СССР декретное время равно поясному времени плюс один час.
- Средние солнечные сутки—интервал времени между моментами двух последовательных одноименных кульминаций среднего Солнца.
- Средняя солнечная секунда—интервал времени, равный  $1/86400$  средних солнечных суток.

## Глава 3

### МЕХАНИКА<sup>1</sup>

#### § 3.1

#### КИНЕМАТИКА

##### Основные понятия кинематики

- Кинематика—раздел механики, в котором изучаются движения материальных тел без учета их масс и действующих на них сил. В кинематике движущиеся объекты рассматриваются как геометрические точки или тела и именуются соответственно точка или тело.
  - Механическое движение (движение)<sup>2</sup>—изменение с течением времени взаимного положения в пространстве материальных тел или взаимного положения частей данного тела. Понятие «механическое движение» может относиться и к геометрическим объектам.
  - Абсолютно твердое тело (твердое тело)—материальное тело, в котором расстояние между любыми двумя точками всегда остается неизменным.
  - Система отсчета—совокупность системы координат и часов, связанных с телом, по отношению к которому изучается движение (или равновесие) каких-нибудь других материальных точек (см. с. 59) или тел.
- Выбор системы отсчета зависит от целей исследования. При кинематических исследованиях все системы отсчета равноправны. В задачах динамики преимущественную роль играют инерциальные системы отсчета.
- Инерциальная система отсчета—система отсчета, в которой справедлив закон инерции. Всякая система отсчета, движущаяся по отношению к инерциальной системе отсчета поступательно, равномерно и прямолинейно, есть также инерциальная система отсчета [72].

<sup>1</sup> Механика—наука о механическом движении и механическом взаимодействии материальных тел. Механика делится на кинематику и кинетику.

<sup>2</sup> Здесь и далее в скобках приводится сокращенный термин, допущенный к применению наравне с основным термином.



- Основная система отсчета. Если рассматривается движение материальных точек или тел одновременно по отношению к нескольким системам отсчета, то основной из этих систем считается та, относительно которой определяется движение остальных.

- Подвижная система отсчета — система отсчета, движущаяся по отношению к основной системе отсчета.

- Естественные оси — прямоугольная система осей с началом в движущейся точке, направленных соответственно по касательной, главной нормали и бинормали к траектории этой точки.

- Элементарное перемещение точки — перемещение точки из данного положения в положение, бесконечно близкое к нему, выражаемое дифференциалом радиуса-вектора точки.

Под радиусом-вектором точки понимается вектор, проведенный от некоторой точки, неизменно связанной с рассматриваемой системой отсчета, до движущейся точки.

- Абсолютное движение точки или тела — движение точки или тела по отношению к основной системе отсчета.

- Относительное движение точки или тела — движение точки или тела по отношению к подвижной системе отсчета.

- Переносное движение — движение подвижной системы отсчета по отношению к основной системе отсчета.

- Траектория — линия, которую описывает точка при своем движении. Если траектория — прямая линия, то движение называется прямолинейным, в противном случае — криволинейным.

- Абсолютная траектория точки — траектория точки по отношению к основной системе отсчета.

- Относительная траектория точки — траектория точки по отношению к подвижной системе отсчета.

- Сложное движение точки или тела (нрк. составное движение точки или тела) — движение точки или тела, исследуемое одновременно в основной и подвижной системах отсчета. При этом могут определяться характеристики движения точки или тела по отношению к каждой из систем отсчета и зависимости между этими характеристиками.

- Поступательное движение твердого тела (поступательное движение) — движение тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки этого тела,

перемещается, оставаясь параллельной своему начальному направлению.

- Вращательное движение твердого тела — движение тела, при котором все точки, лежащие на некоторой прямой, неизменно связанной с телом, остаются неподвижными в рассматриваемой системе отсчета.

\* 1. Эта прямая называется осью вращения.

2. Перемещение вращающегося тела из одного положения в другое называется поворотом.

- Плоскопараллельное движение твердого тела (плоское движение твердого тела) — движение тела, при котором все его точки движутся в плоскостях, параллельных некоторой плоскости, неподвижной в рассматриваемой системе отсчета.

- Движение твердого тела вокруг неподвижной точки (сферическое движение) — движение тела, при котором одна из его точек остается все время неподвижной в рассматриваемой системе отсчета.

- Прецессия — движение твердого тела вокруг неподвижной точки, состоящее из его вращения вокруг оси, неизменно связанной с телом, и движения, при котором эта ось вращается вокруг пересекающей ее оси, неподвижной в рассматриваемой системе отсчета.

\* 1. Ось, связанная с телом, называется *осью собственного вращения*; ось, неподвижная в данной системе отсчета, называется *осью прецессии*; точка пересечения этих осей совпадает с неподвижной точкой тела.

2. Движение, совершаемое при прецессии тела осью собственного вращения, называется *прецессией этой оси*.

- Нутация — происходящее одновременно с прецессией движение твердого тела, при котором изменяется угол между осью собственного вращения и осью прецессии.

- Винтовое движение твердого тела — движение тела, состоящее из его вращения вокруг некоторой оси и поступательного движения со скоростью, параллельной этой оси.

\* 1. Эта ось называется *винтовой осью*.

2. Перемещение тела, совершающего винтовое движение из одного положения в любое другое, называется *винтовым перемещением*.

## Кинематические величины

- Перемещение  $d\mathbf{r}$  — вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и в конце некоторого интервала времени  $dt$ ; вектор перемещения направлен вдоль хорды траектории точки [72] (рис. 3.1).



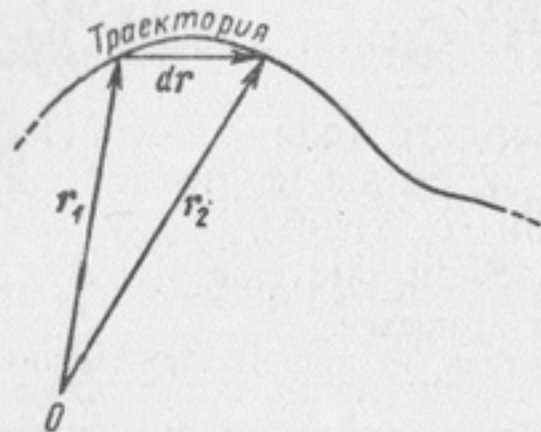


Рис. 3.1. К понятию «перемещение»

водной по времени от радиуса-вектора этой точки, в рассматриваемой системе отсчета:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

В случае равномерного прямолинейного движения модуль скорости<sup>1</sup> точки можно выразить равенством

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

где  $\Delta s$  — путь точки за интервал времени  $\Delta t$ .

Размерность и единица скорости:

$$\dim v = LT^{-1}, [v] = 1 \text{ м/с}.$$

*Метр в секунду* равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м.

\* 1. Допущена к применению получившая широкое распространение на практике внесистемная единица скорости — километр в час (км/ч);  $1 \text{ км/ч} = 0,27777 \text{ м/с}$ .

2. Допущена к применению временно в морской навигации единица скорости — узел (уз);  $1 \text{ уз} = 0,51444 \text{ м/с}$ .

• Абсолютная скорость точки  $\mathbf{v}_a$  — скорость точки в абсолютном движении.

• Относительная скорость точки  $\mathbf{v}_{от}$ ,  $\mathbf{v}_r$  — скорость точки в относительном движении.

• Переносная скорость точки  $\mathbf{v}_{пер}$ ,  $\mathbf{v}_e$  — при сложном движении точки — скорость той неизменно связанной

<sup>1</sup> Здесь и далее, за редким исключением, обозначения векторных величин в формулах даются по модулю, так как принадлежность величины к разряду векторных не имеет значения при определении ее размерности.

• Путь  $s$  точки — расстояние, пройденное точкой за рассматриваемый интервал времени, измеряемое вдоль траектории в направлении движения.

Размерность и единица пути:

$$\dim s = L, [s] = 1 \text{ м}.$$

• Скорость точки  $\mathbf{v}$  — кинематическая мера движения точки, равная производной по времени от радиуса-вектора этой точки,

с подвижной системой отсчета точки пространства, с которой в данный момент времени совпадает движущаяся точка.

\* Скорости абсолютная, относительная и переносная имеют ту же размерность ( $LT^{-1}$ ) и выражаются в той же единице (1 м/с), что и скорость точки.

• Секторная скорость  $\mathbf{v}_\sigma$  — величина, определяющая скорость изменения площади, ометаемой радиусом-вектором  $\mathbf{r}$  движущейся точки.

Модуль секторной скорости может быть выражен равенством

$$v_\sigma = \frac{d\sigma}{dt},$$

где  $d\sigma$  — приращение площади, ометаемой радиусом-вектором за элементарный интервал времени  $dt$  (рис. 3.2).

Размерность и единица секторной скорости точки:

$$\dim v_\sigma = L^2 T^{-1}, [v_\sigma] = 1 \text{ м}^2/\text{с}.$$

*Квадратный метр в секунду* равен секторной скорости, при которой радиус-вектор движущейся точки за интервал времени 1 с ометает площадь 1 м<sup>2</sup>.

Секторную скорость можно представить в виде вектора

$$\mathbf{v}_\sigma = [\mathbf{r} \mathbf{v}] / 2.$$

Со скоростью  $\mathbf{v}$  точки секторная скорость связана соотношением

$$v_\sigma = v h / 2,$$

где  $h$  — длина перпендикуляра, опущенного из центра  $O$  на направление вектора  $\mathbf{v}$ .

\* Понятие «секторная скорость» играет важную роль при изучении движения под действием центральной силы, например силы тяготения. В этом случае секторная скорость остается величиной постоянной, что наблюдается, например, при движении планет (второй закон Кеплера).

• Ускорение точки  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{w}$  — мера изменения скорости точки, равная производной по времени от скорости этой точки в рассматриваемой системе отсчета:

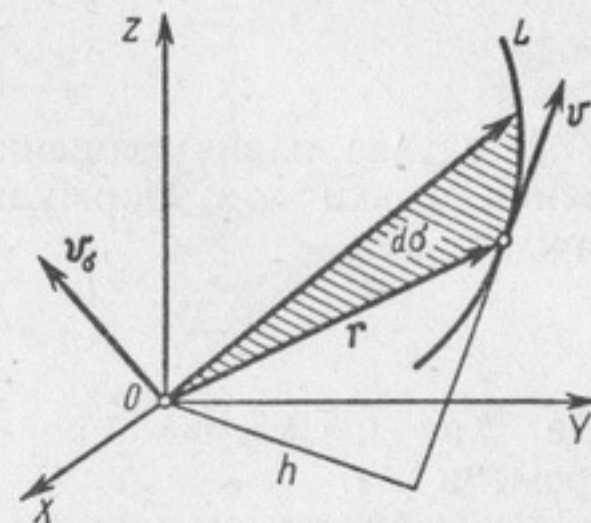


Рис. 3.2. К понятию «секторная скорость»:

$L$  — траектория точки,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор точки, проведенный из некоторого фиксированного центра  $O$ ,  $d\sigma$  — площадь, ометаемая радиусом-вектором точки за бесконечно малый интервал времени  $dt$



$$\mathbf{a} = \frac{dv}{dt}.$$

В случае равноускоренного прямолинейного движения точки эта формула для модуля ускорения примет вид

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

где  $\Delta v$  — изменение скорости точки за интервал времени  $\Delta t$ .

Размерность и единица ускорения:

$$\dim a = LT^{-2}, [a] = 1 \text{ м/с}^2.$$

*Метр на секунду в квадрате* равен ускорению прямолинейного равноускоренного движения точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с.

\* 1. Например, нормальное ускорение свободного падения, установленное Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ, 1901),

$$g = 9,80665 \text{ м/с}^2.$$

2. Для ускорения свободного падения использовалась единица гал; 1 гал = 1 см/с<sup>2</sup>.

В соответствии с [66] в странах — членах СЭВ применение единицы гал и ее дольной единицы миллигал с 1 января 1980 г. не допускается.

● Касательное ускорение точки  $\mathbf{a}_t$ ,  $\mathbf{w}_t$  — составляющая ускорения точки вдоль касательной к траектории при разложении ускорения по естественным осям.

● Нормальное ускорение точки  $\mathbf{a}_n$ ,  $\mathbf{w}_n$  — составляющая ускорения точки вдоль главной нормали к траектории при разложении ускорения по естественным осям.

● Переносное ускорение точки  $\mathbf{a}_{пер}$ ,  $\mathbf{a}_e$ ,  $\mathbf{w}_{пер}$ ,  $\mathbf{w}_e$  — ускорение той неизменно связанной с подвижной системой отсчета точки пространства, с которой при сложном движении точки в данный момент времени совпадает движущаяся точка.

\* 1. Касательное, нормальное и переносное ускорения имеют ту же размерность ( $LT^{-2}$ ) и ту же единицу (1 м/с<sup>2</sup>), что и ускорение точки.

2. Из определения касательного и нормального ускорений следует, что ускорение точки  $\mathbf{a}$  равно векторной сумме касательного и нормального ускорений:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_n.$$

3. Касательное, нормальное и переносное ускорения имеют ту же размерность ( $LT^{-2}$ ) и ту же единицу (1 м/с<sup>2</sup>), что и ускорение точки.

● Угловое перемещение  $d\varphi$  — векторная величина, модуль которой равен бесконечно малому углу  $d\varphi$  поворота тела, а направление совпадает с осью вращения так, что направление поворота отвечает правилу правого винта по отношению к направлению вектора  $d\varphi$  (рис. 3.3).

Сумма двух или нескольких угловых перемещений может определяться по правилам векторного сложения (см., например: *Иродов И. Е. Основные законы механики. 2-е изд. М., 1978; Савельев И. К. Курс общей физики, Т. 1. М., 1986*).

\* В отличие от углового перемещения конечный угол поворота  $\varphi$  тела является величиной скалярной, а не векторной.

Из определения углового перемещения следует, что это безразмерная величина, выражаемая в радианах.

● Угловая скорость  $\omega$  — кинематическая мера вращательного движения тела, выражаемая вектором, равным по модулю первой производной угла поворота тела по времени и направленным вдоль мгновенной оси вращения в ту сторону, откуда элементарный поворот тела виден происходящим против часовой стрелки.

\* Для тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, модуль угловой скорости равен модулю производной от угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

В случае равномерного вращения эта формула принимает вид

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t},$$

где  $\Delta\varphi$  — угол, на который поворачивается тело за интервал времени  $\Delta t$ .

Размерность и единица угловой скорости:

$$\dim \omega = T^{-1}, [\omega] = 1 \text{ рад/с}.$$

*Радан в секунду* равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за

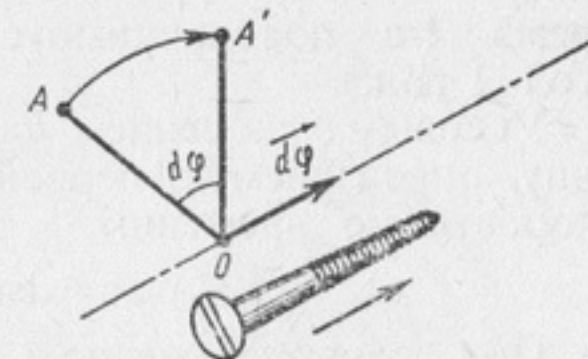


Рис. 3.3. К понятию «угловое перемещение»:

$d\varphi$  — элементарный угол поворота тела  $AO$ ;  $d\varphi$  — угловое перемещение тела, совпадающее по направлению с поступательным движением правого винта при повороте его на угол  $d\varphi$ .



время 1 с поворачиваются относительно оси на угол 1 рад.

• Угловым ускорением называют физическую величину, определяемую первой производной от угловой скорости по времени:

$$\varepsilon = d\omega/dt.$$

При равнопеременном вращении тела угловое ускорение есть величина, равная отношению изменения  $\Delta\omega$  угловой скорости ко времени  $\Delta t$ , в течение которого произошло это изменение:

$$\varepsilon = \Delta\omega/\Delta t.$$

Размерность и единица углового ускорения:

$$\dim \varepsilon = \frac{\dim \omega}{\dim t} = \frac{T^{-1}}{T} = T^{-2},$$

$$[\varepsilon] = \frac{1 \text{ рад/с}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ рад/с}^2.$$

*Радан на секунду в квадрате* равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором оно за время 1 с изменяет угловую скорость на 1 рад/с.

• Частота вращения  $n$  — величина, равная отношению числа  $\Delta N$  полных оборотов равномерно вращающегося тела за интервал времени  $\Delta t$  к этому интервалу:

$$n = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

Размерность и единица частоты вращения:

$$\dim n = \frac{1}{T} = T^{-1}, [n] = \frac{1}{1 \text{ с}} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

*Секунда в минус первой степени* равна частоте вращения, при которой тело, равномерно вращаясь, за время 1 с совершает один оборот.

### § 3.2

#### ДИНАМИКА

• Динамика — раздел механики, в котором изучаются движения механических систем под действием сил.

• Инертность — свойство материального тела, проявляющееся в сохранении движения, совершаемого

им при отсутствии действующих сил, и в постепенном изменении этого движения с течением времени, когда на тело начинают действовать силы.

• Гравитация — универсальное взаимодействие между любыми видами материи.

Сила гравитационного взаимодействия определяется по закону всемирного тяготения Ньютона:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы взаимодействующих материальных точек,  $r$  — расстояние между ними,  $G$  — гравитационная постоянная.

• Масса  $m$  — одна из основных характеристик любого материального объекта, являющаяся мерой его инертности и гравитации<sup>1</sup>.

Масса — основная величина Международной системы единиц. Поэтому размерность и единица массы, как и всех других основных величин СИ, установлены произвольно:

$$\dim m = M, [m] = 1 \text{ кг}.$$

*Килограмм* равен массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1889) и III ГКВМ (1901)] (рис. 3.4).

Рекомендуемые кратные и дольные единицы массы: Мг, г; мг; мкг.

• Материальная точка — точка, обладающая массой [58]. В дополнение к такому лаконичному определению материальной точки приведем определение, которое дается в [72].

• Материальная точка — понятие, вводимое в механике для обозначения объекта, который рассматривается как точка, имеющая массу. Положение



Рис. 3.4. Международный прототип килограмма

<sup>1</sup> Следует отметить, что первоначально (1799) килограмм был введен как единица веса. В то время не было различия между массой и весом.



материальной точки в пространстве определяется положением геометрической точки, что существенно упрощает решение задач механики. Практически тело можно считать материальной точкой в случаях, когда оно движется поступательно или когда вращательную часть его движения можно в условиях рассматриваемой задачи не учитывать (например, при изучении движения Земли вокруг Солнца). При движении любой механической системы (в частности, твердого тела) ее центр масс (см. с. 79) движется так же, как двигалась бы материальная точка с массой, равной массе всей системы, под действием всех внешних сил, приложенных к системе.

● Механическая система (система) — любая совокупность материальных точек.

\* В механике материальное тело рассматривается как механическая система, образованная непрерывной совокупностью материальных точек.

● Масса механической системы — сумма масс материальных точек, образующих систему.

● Инерциальная система отсчета — система отсчета, по отношению к которой изолированная материальная точка находится в покое или движется прямолинейно и равномерно.

\* Система отсчета, не обладающая этим свойством, называется неинерциальной системой отсчета.

● Плотность  $\rho$  — величина, определяемая для однородного вещества отношением массы тела к его объему. Плотность неоднородного вещества в определенной точке — предел отношения массы к его объему, когда объем стремится к этой точке:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta m / \Delta V.$$

Средняя плотность неоднородного тела также есть отношение  $m/V$ .

Размерность и единица плотности:

$$\dim \rho = L^{-3} M, [\rho] = 1 \text{ кг/м}^3.$$

Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме  $1 \text{ м}^3$  равна  $1 \text{ кг}$ .

\* Плотность газа равна произведению массы  $m_m$  молекулы газа на плотность числа молекул (концентрацию молекул)  $n$  газа:

$$\rho = m_m n.$$

Рекомендуемые кратные и дольные единицы плотности:  $\text{Мг/м}^3$ ;  $\text{кг/дм}^3$ ;  $\text{г/см}^3$ . Допущены к применению внесистемные единицы плотности:  $\text{т/м}^3$ ;  $\text{кг/л}$ ;  $\text{г/мл}$ ;  $\text{г/л}$ .

● Удельный объем  $v$  — величина, равная отношению объема  $V$  однородного тела к его массе  $m$ :

$$v = V/m.$$

Размерность и единица удельного объема:

$$\dim v = L^3 M^{-1}, [v] = 1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Кубический метр на килограмм равен удельному объему однородного тела, один кубический метр которого имеет массу  $1 \text{ кг}$ .

● Сила  $F$  — векторная величина, являющаяся мерой механического действия одного материального тела на другое.

Это действие вызывает изменение скоростей точек тела или его деформацию как при непосредственном контакте (давление прижатых друг к другу тел, трение), так и через посредство создаваемых телами полей (поле тяготения, электромагнитное поле). В каждый момент времени сила характеризуется направлением в пространстве, размером и точкой приложения.

Из второго закона Ньютона

$$F = ma$$

можно определить размерность и единицу силы:

$$\dim F = LMT^{-2}, [F] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 = 1 \text{ Н}.$$

Ньютон равен силе, придающей телу массой  $1 \text{ кг}$  ускорение  $1 \text{ м/с}^2$  в направлении действия силы.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы силы:  $\text{МН}$ ;  $\text{кН}$ ;  $\text{мН}$ ;  $\text{мкН}$ .

● Внешняя сила  $F_e$  — сила, действующая на какую-либо материальную точку механической системы со стороны тел, не принадлежащих рассматриваемой механической системе.

● Внутренняя сила  $F_i$  — сила, действующая на какую-либо материальную точку механической системы со стороны других материальных точек, принадлежащих рассматриваемой механической системе.

● Поверхностные силы — силы, действующие на точки поверхности материального тела.



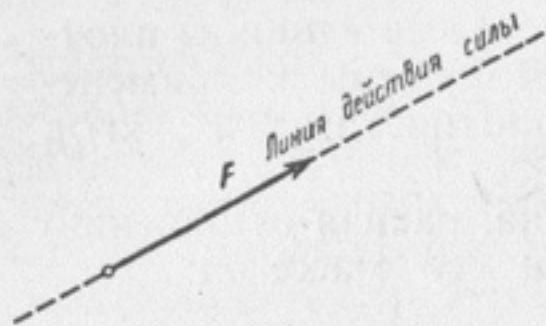


Рис. 3.5. Линия действия силы

- Несвободное твердое тело — твердое тело, на перемещение которого наложены ограничения.
- Связи — ограничения, налагаемые на положения и скорости точек механической системы, которые должны выполняться при любых действующих на систему силах.
- Реакция связей (нрк. силы реакции) — силы, действующие на материальные точки механической системы со стороны материальных тел, осуществляющих связи, наложенные на эту систему.

Реакции связей имеют размерность силы и выражаются в ньютонах.

- Линия действия силы — прямая, вдоль которой направлен вектор, изображающий силу (рис. 3.5).
- Система сил — любая совокупность сил, действующих на механическую систему.
- Система сходящихся сил — система сил, линии действия которых пересекаются в одной точке.
- Система параллельных сил — система сил, линии действия которых параллельны.
- Плоская система сил — система сил, линии действия которых лежат в одной плоскости.
- Пространственная система сил — система сил, линии действия которых не лежат в одной плоскости.
- Главный вектор системы сил — величина, равная сумме всех сил системы:

$$\mathbf{R} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i.$$

Очевидно, что главный вектор системы сил имеет размерность силы и выражается в ньютонах.

- Плечо силы  $h$  относительно точки — расстояние от данной точки до линии действия силы (рис. 3.6).

Размерность и единица плеча силы:

- Массовые силы — силы, действующие на каждую частицу материального тела и пропорциональные массам этих частиц.

\* Примером массовой силы является гравитационная сила.

- Свободное твердое тело — твердое тело, на перемещение которого не наложено никаких ограничений.

$$\dim h = L, [h] = 1 \text{ м.}$$

- Момент силы относительно точки  $O$   $M_O$  — величина, равная векторному произведению радиуса-вектора, проведенного из данной точки в точку приложения силы, на эту силу:

$$\mathbf{M}_O = [\mathbf{r}\mathbf{F}].$$

\* Точку, относительно которой берется момент силы, можно называть *центром момента*, а момент силы относительно точки — *моментом силы относительно центра*.

Модуль момента силы:

$$M_O = rF \sin [\widehat{rF}].$$

Размерность и единица момента силы:

$$\dim M = L^2 MT^{-2}, [M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

*Ньютон-метр* равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы.

- Момент силы относительно оси  $M_x$  — величина, равная проекции на эту ось момента силы относительно любой точки оси.

Из этого определения следует, что момент силы относительно оси есть величина скалярная. Ее размерность и единица те же, что и момента силы относительно точки.

- Главный момент системы сил относительно центра (главный момент системы) — величина, равная сумме моментов всех сил системы относительно данного центра.
- Пара сил (пара) — система двух параллельных сил, равных по модулю и направленных в противоположные стороны.
- Плечо пары  $h$  — расстояние между линиями действия сил пары.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы момента силы и момента пары сил: МН · м; кН · м; мН · м; мкН · м.

- Момент инерции механической системы относительно оси (динамический момент инерции)  $J$  — величина, равная сумме произведений масс всех материальных точек, образующих механическую систему, на квадраты их расстояний до данной оси:

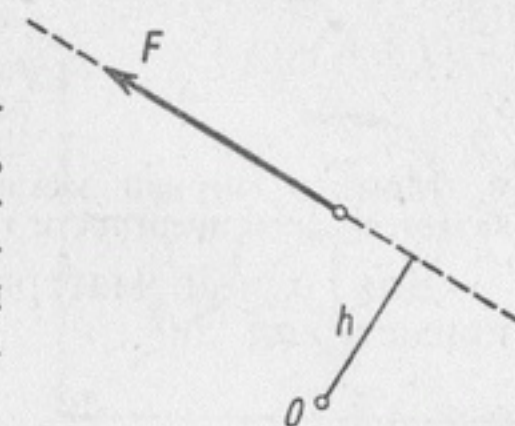


Рис. 3.6. Плечо силы



$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (3.1)$$

\* Момент инерции механической системы относительно оси является мерой инертности тела при его вращении вокруг этой оси.

Для одной материальной точки формула (3.1) примет вид

$$J = mr^2,$$

где  $m$  — масса материальной точки,  $r$  — расстояние от точки до оси вращения.

Размерность и единица момента инерции:

$$\dim J = L^2 M, \quad [J] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Килограмм-метр в квадрате равен моменту инерции материальной точки массой 1 кг, находящейся на расстоянии 1 м от оси вращения.

• Радиус инерции системы относительно оси (радиус инерции)  $R$  — величина, квадрат которой равен отношению момента инерции механической системы относительно данной оси к массе этой системы.

Очевидно, что радиус инерции имеет размерность длины и выражается в метрах.

• Центробежный момент инерции (нрк. произведение инерции)  $J_{xy}$ ,  $J_{yz}$ ,  $J_{zx}$  — величина, равная сумме произведений масс всех материальных точек, образующих механическую систему, на две их координаты в данной прямоугольной системе координат.

Размерность и единица центробежного момента инерции:

$$\dim J_{xy} = \dim J_{yz} = \dim J_{zx} = L^2 M,$$

$$[J_{xy}] = [J_{yz}] = [J_{zx}] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

• Моменты инерции площади плоской фигуры — осевой, полярный, центробежный — геометрические характеристики плоских сечений тел. Они характеризуют жесткость тел при изгибе и кручении.

• Осевой момент инерции площади  $J_x$  плоской фигуры относительно оси  $X$ , лежащей в плоскости фигуры (рис. 3.7), — величина, равная сумме произведений площадей  $dS$  всех элементов фигуры на квадраты их расстояний до этой оси:

$$J_x = \int_S y^2 dS. \quad (3.2)$$

Аналогично можно выразить осевой момент инерции площади плоской фигуры относительно оси  $Y$ :

$$J_y = \int_S x^2 dS.$$

• Полярный момент инерции площади  $J_p$  плоской фигуры относительно полюса, лежащего в плоскости фигуры, — величина, равная сумме произведений площадей  $dS$  всех элементов плоской фигуры на квадраты расстояний  $\rho$  элементов от полюса.

Из рис. 3.7 следует, что полярный момент инерции  $J_p$  площади плоской фигуры выразится соотношением

$$J_p = \int_S \rho^2 dS. \quad (3.3)$$

• Центробежный момент инерции площади  $J_{xy}$  плоской фигуры относительно двух взаимно перпендикулярных осей  $X$  и  $Y$ , лежащих в плоскости фигуры, — величина, равная сумме произведений площадей  $dS$  элементов фигуры на расстояния элементов от этих осей:

$$J_{xy} = \int_S xy dS. \quad (3.4)$$

Из сравнения формул (3.2) — (3.4) можно сделать заключение, что все моменты инерции площади плоской фигуры имеют одну и ту же размерность и выражаются в одинаковых единицах.

Проще всего эти общие размерность и единицу можно найти применив формулу (3.2) к однородному прямоугольнику, центр масс которого совпадает с началом системы координат  $O$ , а длинная его сторона  $a$  параллельна оси  $OX$  (рис. 3.8).

По формуле (3.2) найдем

$$\begin{aligned} J_x &= \int_S y^2 dS = \int_{-b/2}^{b/2} y^2 a dy = a \int_{-b/2}^{b/2} y^2 dy = \\ &= a \frac{y^3}{3} \Big|_{-b/2}^{b/2} = a \left( \frac{b^3}{3 \cdot 8} + \frac{b^3}{3 \cdot 8} \right) = \frac{2ab^3}{24}, \end{aligned}$$

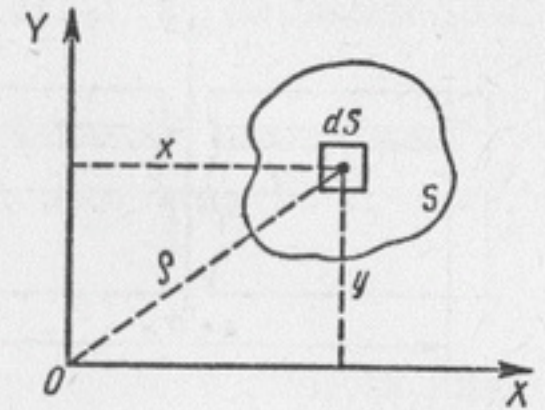


Рис. 3.7. К определению осевого и полярного моментов инерции плоской фигуры:  $dI_x = y^2 dS$  и  $dI_y = x^2 dS$  — элементарные осевые моменты инерции площади относительно полюса  $O$



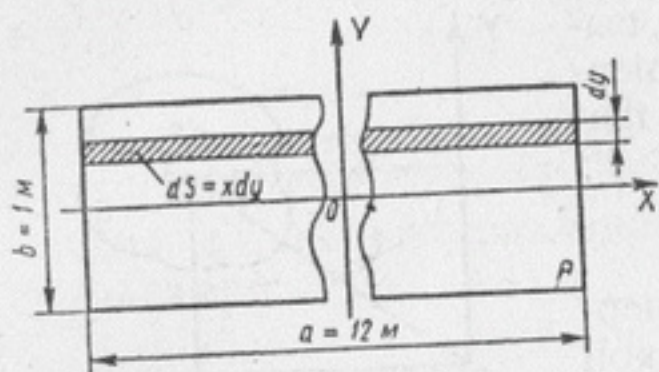


Рис. 3.8. К определению центробежного момента инерции площади плоской фигуры:

$P$  — плоская прямоугольная фигура длиной  $a$  и шириной  $b$ ;  $O$  — начало координат, совпадающее с центром тяжести фигуры;  $dS = x dy$  — площадь бесконечно малого элемента фигуры

гугры, в формуле (3.5) следует положить  $a = 12$  м и  $b = 1$  м:

$$[J_x] = [J_y] = [J_{xy}] = \frac{12 \text{ м} \cdot 1 \text{ м}^3}{12} = 1 \text{ м}^4.$$

Метр в четвертой степени равен осевому моменту инерции площади прямоугольника длиной 12 м и шириной 1 м относительно оси, параллельной длинной стороне и проходящей через центр прямоугольника.

• Давление  $p$  — физическая величина, равная отношению силы  $dF$ , действующей на элемент поверхности нормально к ней, к площади  $dS$  этого элемента:

$$p = dF/dS.$$

При равномерном распределении силы  $F$  по поверхности площадью  $S$  давление выражается формулой

$$p = F/S.$$

Размерность и единица давления:

$$\dim p = L^{-1}MT^{-2}, [p] = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Па}.$$

Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы давления: ГПа; МПа; кПа; гПа; даПа; мПа; мкПа.

• Нормальное напряжение  $\sigma$  — величина, равная отношению нормальной к поперечному сечению тела

или окончательно

$$J_x = \frac{ab^3}{12}. \quad (3.5)$$

\* Пользуясь формулой (3.5), найдем размерность осевого момента инерции площади плоской фигуры, а следовательно, и всех моментов инерции площади плоских фигур:

$$\dim J_x = \dim J_y = \dim J_{xy} = LL^3 = L^4.$$

Чтобы получить общую единицу всех моментов инерции площади плоской фигуры,

составляющей  $dF_n$  упругой силы к площади  $dS$  этого сечения:

$$\sigma = dF_n/dS.$$

При равномерном распределении силы по сечению эта формула примет вид

$$\sigma = F_n/S.$$

Размерность и единица нормального напряжения:

$$\dim \sigma = L^{-1}MT^{-2}, [\sigma] = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}.$$

• Касательное напряжение  $\tau$  — величина, равная отношению касательной к поперечному сечению тела составляющей упругой силы к площади этого сечения.

Размерность и единица касательного напряжения те же, что и нормального напряжения.

\* В поперечном сечении (бруса, вала) при растяжении, сжатии и чистом изгибе действуют только нормальные напряжения, направленные перпендикулярно плоскости сечения тела, а при сдвиге и кручении — только касательные напряжения, лежащие в плоскости сечения тела.

Рекомендуемые кратные единицы напряжения: ГПа; МПа; кПа.

• Модуль упругости — величина, характеризующая упругие свойства материалов при малых деформациях [72].

При больших деформациях, как показывает опыт, нарушается пропорциональность между деформацией и приложенным напряжением. Напряжение  $\sigma$ , при котором нарушается пропорциональность между напряжением и относительной деформацией, называется пределом пропорциональности.

• Модуль продольной упругости (модуль Юнга)  $E$  — величина, равная отношению нормального напряжения  $\sigma$  к относительному удлинению (или укорочению)  $\epsilon = \Delta l/l$ :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\Delta l/l}, \quad (3.6)$$

где  $\Delta l$  — абсолютное удлинение (или абсолютное укорочение),  $l$  — первоначальная длина тела (стержня).

Размерность и единица модуля Юнга:

$$\dim E = L^{-1}MT^{-2}, [E] = 1 \text{ Па}.$$



- Модуль сдвига (модуль поперечной упругости)  $G$  — величина, равная отношению касательного напряжения  $\tau$  к углу сдвига  $\gamma$  между плоскостями, к которым применимо это касательное напряжение:

$$G = \tau / \gamma.$$

Размерность и единица модуля сдвига:

$$\dim G = L^{-1}MT^{-2}, [G] = 1 \text{ Па}.$$

- Модуль объемной упругости  $K$  — величина, равная отношению нормального напряжения  $\sigma$ , возникающего при всестороннем сжатии, к относительному изменению объема  $\Theta = \Delta V / V$ :

$$K = \frac{\sigma}{\Theta} = \frac{\sigma}{\Delta V / V}.$$

Размерность и единица модуля объемной упругости:

$$\dim K = L^{-1}MT^{-2}, [K] = 1 \text{ Па}.$$

\* 1. Рассмотренные выше модули упругости связаны между собой соотношениями

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (3.7)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad (3.8)$$

где  $\mu = \varepsilon_1 / \varepsilon$  — коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона),  $\varepsilon_1$  — относительная поперечная деформация.

2. Модули  $E$  и  $\mu$  определяются экспериментально. Модули  $G$  и  $K$  вычисляются по формулам (3.7) и (3.8).

- Градиент скорости  $\text{grad } v$  — векторная величина, определяемая соотношением

$$\text{grad } v = (dv/dl) \mathbf{i},$$

где  $dl$  — элемент нормали к поверхности слоя жидкости (газа);  $\mathbf{i}$  — единичный вектор нормали. Градиент скорости показывает быстроту изменения скорости при переходе от одного слоя жидкости (газа) к другому слою.

Размерность и единица градиента скорости:

$$\dim \text{grad } v = T^{-1}, [\text{grad } v] = \frac{1 \text{ м/с}}{1 \text{ м}} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Секунда в минус первой степени равна градиенту скорости, при котором скорости слоев жидкости

(газа), отстоящих друг от друга на расстоянии 1 м, отличаются на 1 м/с.

- Динамическая вязкость  $\eta$  — физическая величина, равная отношению тангенциальной силы  $F_\tau$ , необходимой для поддержания градиента скорости, равного единице, между двумя параллельными слоями жидкости (газа), к площади соприкосновения этих слоев [72].

Динамическую вязкость выразим из формулы

$$F = \eta \frac{dv}{dl} \Delta S, \quad (3.9)$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость,  $F$  — модуль силы внутреннего трения между слоями жидкости,  $dv/dl$  — модуль градиента скорости,  $\Delta S$  — площадь соприкосновения слоев жидкости.

Из (3.9) получим

$$\eta = \frac{F}{(dv/dl) \Delta S}.$$

Размерность и единица динамической вязкости:

$$\dim \eta = L^{-1}MT^{-2}, [\eta] = 1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2 = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Паскаль-секунда равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости, равной 1 м/с, равно 1 Па.

Рекомендуемая кратная единица: МПа · с.

- Кинематическая вязкость  $\nu$  — величина, равная отношению динамической вязкости к плотности  $\rho$  вещества:

$$\nu = \eta / \rho.$$

Размерность и единица кинематической вязкости:

$$\dim \nu = \frac{L^{-1}MT^{-2}}{L^{-3}M} = L^2T^{-1},$$

$$[\nu] = \frac{1 \text{ Па} \cdot \text{с}}{1 \text{ кг/м}^3} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2}{1 \text{ кг/м}^3} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{кг}} = 1 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Квадратный метр на секунду равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1 Па · с и плотностью 1 кг/м<sup>3</sup>.



Рекомендуемая доля единица кинематической вязкости:  $\text{мм}^2/\text{с}$ .

• Поверхностное натяжение  $\alpha$  жидкости — величина, равная отношению силы  $dF$ , действующей на элемент контура поверхности жидкости, к длине  $dl$  этого элемента контура:

$$\alpha = dF/dl.$$

Размерность и единица поверхностного натяжения:

$$\dim \alpha = \text{MT}^{-2}, [\alpha] = 1 \text{ Н/м}.$$

Ньютон на метр равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности.

Рекомендуемая доля единица величина поверхностного натяжения:  $\text{мН/м}$ .

\* В [72] величине «поверхностное натяжение» даны еще два следующие определения:

1. Поверхностное натяжение — термодинамическая характеристика поверхности раздела двух фаз (тел), определяемая работой обратимого изотермического образования единицы площади этой поверхности.

2. Поверхностное натяжение — мера нескомпенсированности межмолекулярных сил в поверхностном (межфазном) слое или избытка свободной энергии в поверхностном слое по сравнению со свободной энергией в объемах фаз. Для подвижных жидкостей поверхностное натяжение — величина, тождественно равная свободной поверхностной энергии.

При таких определениях поверхностного натяжения его единицей является джоуль на квадратный метр ( $\text{Дж/м}^2$ ).

• Прочность твердых тел — свойство твердых тел сопротивляться разрушению (разделению на части), а также необратимому изменению формы.

• Пластичность — свойство твердых тел сохранять часть деформации при снятии нагрузок, которые их вызвали.

• Твердость — характеристика материала, отражающая его прочность и пластичность. Твердость определяется методом вдавливания шарика (метод Бринелля) и призмы (метод Виккерса).

Сущность метода Бринелля заключается во вдавливании под нагрузкой в испытываемый материал шарикового наконечника и измерении диаметра плас-

тического отпечатка, получающегося на поверхности изделия.

Количественной оценкой твердости является число твердости.

• Число твердости НВ — величина, равная отношению нагрузки (в ньютонах) к площади поверхности отпечатка (в квадратных миллиметрах), и определяется по формуле

$$\text{НВ} = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где  $F$  — нагрузка, Н;  $D$  — диаметр шарика, мм;  $d$  — диаметр отпечатка, мм.

При испытании материалов с различными упругими и пластическими свойствами соблюдается условие: для всех материалов должны быть одинаковые степени нагружения (отношение нагрузки к квадрату диаметра шарика). Определенные степени нагружения образуют шкалы твердости Бринелля. Чтобы охарактеризовать тот или иной материал по твердости Бринелля, необходимо знать, по какой шкале это измерение проводилось.

Твердость — величина безразмерная, выражается в условных единицах, которые не входят в состав Международной системы единиц.

• Количество движения точки (импульс)<sup>1</sup>  $p$  — векторная мера механического движения, равная произведению массы материальной точки на ее скорость:

$$p = mv.$$

Размерность и единица импульса материальной точки:

$$\dim p = \text{LMT}^{-1}, [p] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Килограмм-метр в секунду равен количеству движения материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

• Количество движения системы  $Q$  — величина, равная векторной сумме количества движения всех материальных точек, образующих механическую систему.

<sup>1</sup> В физике предпочтительным является термин «импульс» (см., например, [28, 63, 65]), в теоретической механике — «количество движения» [58].



Очевидно, что количество движения системы имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и количество движения материальной точки.

● Момент количества движения<sup>1</sup> точки относительно центра (кинетический момент точки относительно центра)  $M_0(mv)$  — величина, равная векторному произведению радиуса-вектора материальной точки, проведенного из этого центра, на ее количество движения:

$$M_0 = [r \cdot mv].$$

Модуль момента количества движения

$$M_0 = mvr \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между радиусом-вектором и скоростью точки.

Размерность и единица момента количества движения:

$$\dim M_0 = L^2 MT^{-1}, [M_0] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

*Килограмм-метр в квадрате на секунду* равен моменту количества движения материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей количество движения 1 кг·м/с.

● Момент количества движения точки относительно оси (кинетический момент точки относительно оси)  $M_x(mv)$  — величина, равная проекции на эту ось момента количества движения точки относительно любого выбранного на данной оси центра.

● Главный момент количества движения системы относительно центра (кинетический момент системы относительно центра)  $K_0$  — величина, равная сумме моментов количества движения всех точек механической системы относительно этого центра.

● Главный момент количества движения системы относительно оси (кинетический момент системы относительно оси)  $K_x$  — величина, равная сумме моментов количества движения всех точек механической системы относительно этой оси.

<sup>1</sup> В квантовой механике используется термин «угловой момент» (см., например, [60]), в физике — термин «момент импульса» (см., например, [28, 63, 65]), в теоретической механике — «момент количества движения» [58].

● Элементарный импульс силы  $dS$  — векторная мера действия силы, равная произведению силы на элементарный интервал времени ее действия:

$$dS = F dt.$$

● Импульс силы за конечный интервал времени — величина, равная определенному интегралу от элементарного импульса силы, где пределами интеграла являются моменты начала и конца данного интервала времени:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} F dt.$$

В случае постоянной силы эта формула примет вид

$$S = F \Delta t.$$

Размерность и единица импульса силы:

$$\dim S = LMT^{-1}, [S] = 1 \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

*Ньютон-секунда* равна импульсу силы, равной 1 Н и действующей в течение 1 с.

\* Импульс силы равен изменению количества движения.

● Элементарная работа силы  $dA$  — скалярная мера действия силы, равная скалярному произведению силы на элементарное перемещение точки ее приложения:

$$dA = F dr = F \cos \alpha dr. \quad (3.10)$$

● Работа силы на конечном перемещении  $A$  — величина, равная криволинейному интегралу от элементарной работы силы, взятому вдоль дуги кривой, описанной точкой приложения силы при этом перемещении.

\* Если сила последовательно действует на разные точки механической системы (тела), то ее работа при конечном перемещении системы равна пределу суммы соответствующих элементарных работ.

Размерность и единица работы:

$$\dim A = L^2 MT^{-2}, [A] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}.$$

*Джоуль* равен работе силы 1 Н, перемещающей тело на расстояние 1 м в направлении действия силы.



Рекомендуемые кратные и дольные единицы работы: ТДж; ГДж; МДж; кДж; мДж.  
 • Мощность силы<sup>1</sup> (мощность)  $P$  — величина, равная скалярному произведению силы на скорость точки ее приложения:

$$P = Fv \cos \alpha. \quad (3.11)$$

Мощность можно определить также как первую производную работы по времени:

$$P = dA/dt. \quad (3.12)$$

Размерность и единица мощности:

$$\dim P = L^2 MT^{-3}, [P] = 1 \text{ Дж} \cdot \text{с} = 1 \text{ Вт}.$$

*Ватт* равен мощности, при которой работа 1 Дж производится за время 1 с.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы мощности: ГВт; МВт; кВт; мВт; мкВт.

• Энергия  $E$  — скалярная физическая величина, являющаяся общей мерой различных форм движения материи. Различным видам движения и взаимодействия материи соответствуют разные виды энергии: механическая (кинетическая и потенциальная), внутренняя, электромагнитная, ядерная и др.

В разделе «Механика» рассматриваются только кинетическая и потенциальная энергия.

• Кинетическая энергия  $T$  — энергия механического движения тела, частицы, системы тел.

По формуле энергии поступательного движения твердого тела

$$T = mv^2/2,$$

где  $m$  — масса тела,  $v$  — его скорость, определяем размерность и единицы кинетической энергии:

$$\dim T = L^2 MT^{-2}, [T] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2 = 1 \text{ Дж}.$$

• Потенциальная энергия  $\Pi$  механической системы — энергия, зависящая только от взаимного расположения частиц системы и от положения их во внешнем потенциальном поле.

По формуле энергии материальной точки, находящейся в гравитационном поле Земли на высоте  $h$  над ее поверхностью,

<sup>1</sup> Термин «мощность силы» рекомендован [58]; мощность в этом случае является усеченной (краткой) формой термина, допущенной к применению.

$$\Pi = mgh,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, определяем размерность и единицу потенциальной энергии:

$$\dim \Pi = L^2 MT^{-2}; [\Pi] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2 = 1 \text{ Дж}.$$

Рассмотренные два примера показывают, что кинетическая и потенциальная энергии имеют одинаковые размерности и одинаковые единицы, совпадающие с размерностью и единицей работы. Это можно показать и для всех других видов энергии.

• Коэффициент полезного действия  $\eta$  системы — величина, равная отношению энергии  $E_{\text{пол}}$  полезно использованной системой к энергии полученной системой, т. е.

$$\eta = E_{\text{пол}}/E.$$

Из этой формулы следует, что коэффициент полезного действия — величина относительная и выражается в безразмерных единицах.

Для выражения коэффициента полезного действия, как и для некоторых других относительных величин, допущены к применению единицы: процент (%), промилле (‰) и др. (см. табл. 5).

• Сила тяжести  $P$  — сила, действующая на любую материальную частицу, находящуюся вблизи земной поверхности, и равная геометрической сумме силы притяжения Земли  $F$  (рис. 3.9) и переносной силы инерции  $F_{\text{пер}}$ , учитывающей эффект суточного вращения Земли (аналогично определяется понятие «сила тяжести» на других небесных телах):

$$P = F + F_{\text{пер}}.$$

Переносная сила инерции  $F_{\text{пер}}$  зависит от места наблюдения (рис. 3.9):

$$F_{\text{пер}} = mh\omega^2$$

или

$$F_{\text{пер}} = mR\omega^2 \cos \lambda,$$

где  $m$  — масса частицы,  $h$  — расстояние от ее земной оси,  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли,  $R$  — радиус Земли,  $\lambda$  — геоцентрическая широта места наблюдения.

Из-за малости  $\omega$  сила тяжести мало отличается от силы притяжения  $F$ . Однако при точных



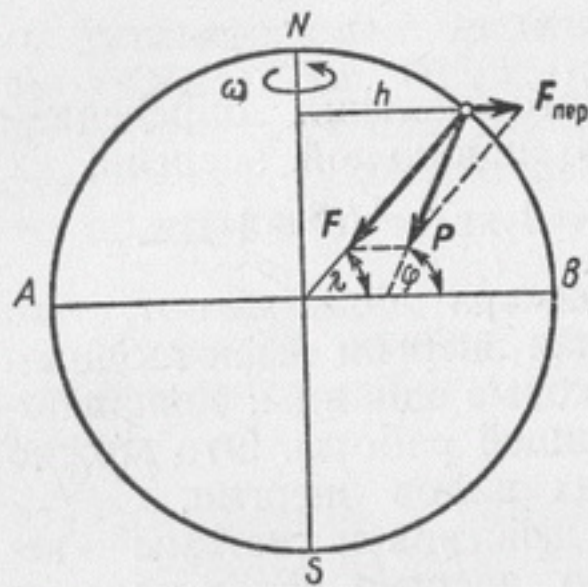


Рис. 3.9. К определению понятия «сила тяжести»:

$\lambda$  — геоцентрическая широта точки земной поверхности,  $\phi$  — ее астрономическая широта. Широты  $\lambda$  и  $\phi$  очень незначительно отличаются друг от друга; наибольшая разность между углами  $\phi$  и  $\lambda$  около  $11'$  (при  $\lambda = 45^\circ$ );  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси

несколько убывает вследствие возрастания переносной силы инерции  $F_{\text{пер}}$  и уменьшения силы притяжения  $F$  из-за несферичности Земли; на экваторе сила тяжести примерно на 0,5% меньше, чем на полюсе.

Под действием силы тяжести все тела получают ускорение, называемое ускорением свободного падения:

$$g = P/m.$$

- Напряженность гравитационного поля  $G$  — векторная величина, равная отношению силы  $F$ , действующей на материальную точку, помещенную в поле, к массе  $m$  этой точки:

$$G = F/m. \quad (3.13)$$

Под действием этой силы свободная материальная точка в гравитационном поле в соответствии со вторым законом Ньютона получит ускорение

$$a = F/m. \quad (3.14)$$

Сравнивая формулы (3.13) и (3.14), найдем, что материальная точка, помещенная в гравитационное поле, получает ускорение, равное напряженности этого поля.

измерениях, например в гравиметрии, учитывается переносная сила инерции, а также влияние на силу тяжести других небесных тел. В связи с этим в [24] дано такое ее определение: «Сила тяжести Земли — сила воздействия гравитирующего тела Земли на притягиваемую массу, складывающаяся из силы ньютоновского притяжения, центробежной силы Земли и притяжения небесных тел».

При перемещении вдоль поверхности Земли от полюса к экватору значение силы тяжести

Пользуясь законом всемирного тяготения можно получить, что напряженность гравитационного поля неподвижной материальной точки, помещенной в начало координат, выразится равенством

$$G = \gamma \frac{m}{r^3} r,$$

где  $r$  — радиус-вектор рассматриваемой точки поля.

Размерность и единица напряженности гравитационного поля:

$$\dim G = \frac{\dim F}{\dim m} = \frac{LMT^{-2}}{M} = LT^{-2}.$$

$$[G] = 1 \text{ м/с}^2.$$

- Потенциал гравитационного поля  $\phi$  — скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии  $\Pi$  материальной точки, помещенной в соответствующую точку поля, к массе  $m$  материальной точки:

$$\phi = \Pi/m. \quad (3.15)$$

Потенциал  $\phi$  гравитационного поля, созданного неподвижной материальной точкой, является функцией координат точек поля и определяется формулой

$$\phi = \frac{\gamma m}{r},$$

где  $m$  — масса материальной точки, создающей поле,  $r$  — расстояние от нее до точки поля, в которой определяется потенциал.

Размерность и единица потенциала гравитационного поля:

$$\dim \phi = \frac{\dim \Pi}{\dim m} = \frac{L^2MT^{-2}}{M} = L^2T^{-2},$$

$$\phi = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Джоуль на килограмм равен потенциалу гравитационного поля в точке поля, в которой материальная точка массой 1 кг обладает потенциальной энергией 1 Дж.

- Градиент потенциала гравитационного поля  $\text{grad } \phi$  — векторная величина, по направлению совпадающая



с направлением максимального возрастания потенциала вдоль нормали к поверхности равного потенциала и равная отношению разности потенциалов двух точек, лежащих на нормали, к расстоянию между ними. В общем случае

$$\text{grad } \varphi = -\frac{d\varphi}{dr} \mathbf{i},$$

где  $\mathbf{i}$  — единичный вектор нормали;  $dr$  — элемент нормали к эквипотенциальной поверхности. В случае однородного гравитационного поля

$$\text{grad } \varphi = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{d} \mathbf{i}, \quad (3.16)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — потенциалы в двух точках поля,  $d$  — расстояние между поверхностями равного потенциала, проходящими через эти точки.

Положив в формуле (3.16)  $\varphi_1 - \varphi_2 = 1$  Дж/кг,  $d = 1$  м,  $i = |\mathbf{i}| = 1$ , получим единицу градиента потенциала:

$$[\text{grad } \varphi] = \frac{1 \text{ Дж/кг}}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{м)}.$$

Эта единица называется *джоуль на килограмм-метр*. Размерность градиента потенциала гравитационного поля:

$$\dim \text{grad } \varphi = LT^{-2}.$$

В теории поля доказывается, что градиент потенциала равен напряженности поля, взятой с обратным знаком, т. е.

$$\mathbf{G} = -\text{grad } \varphi.$$

Отсюда следует, что напряженность гравитационного поля может выражаться в тех же единицах, что и градиент потенциала, т. е. в джоулях на килограмм-метр.

• Вес тела  $P$ ,  $G$  — модуль равнодействующей сил тяжести, действующих на частицы этого тела [58].

Аналогичное определение дано в [72]: вес — численная величина силы тяжести, действующей на тело, находящееся вблизи земной поверхности.

Отсюда следует, что вес — величина скалярная. Однако в учебных пособиях по курсу общей физики,

наиболее известных в настоящее время, дается определение веса как векторной величины.

«Весом тела называется сила  $P$ , с которой это тело действует на подставку, на которой оно лежит, или тянет за подвес, к которому оно подвешено. При этом предполагается, что тело, подставка и подвес покоятся в той системе отсчета, в которой производится взвешивание» [65].

«Сила  $G$ , с которой тело действует на подвес или опору, называется весом тела. Эта сила равна  $mg$  лишь в том случае, если тело и опора (или подвес) неподвижны относительно Земли» [63].

«Если тело несвободно (например, находится на поверхности Земли, лежит на полу или подвешено к потолку кабины лифта и т. п.), то под влиянием поля тяготения тело действует с некоторой силой  $Q$  на опору или подвес, удерживающие его от свободного движения в поле тяготения. Эту силу называют весом тела» [28].

\* Если бы Земля имела точно форму шара и плотность ее была одинакова во всех точках, то вес, если его считать векторной величиной, был бы направлен к центру Земли. В действительности же направление веса в данной точке поверхности зависит от ряда причин: от формы Земли, от распределения тяжелых и легких пород. Зависит вес и от ландшафта местности вблизи точки наблюдения. Например, вблизи большой горы вес направлен «вбок».

• Удельный вес  $\gamma$  однородного тела — величина, равная отношению веса тела  $P$  к его объему  $V$ :

$$\gamma = P/V.$$

Для неоднородного тела понятие удельного веса практически не применяется.

Размерность и единица удельного веса:

$$\dim \gamma = L^{-2}MT^{-2}, \quad [\gamma] = \text{Н/м}^3.$$

*Ньютон на кубический метр* равен удельному весу однородного тела, имеющего вес 1 Н при объеме 1 м<sup>3</sup>.

• Центр масс механической системы (центр масс. Нрк. центр инерции) — геометрическая точка, для которой сумма произведений масс всех материальных точек, образующих механическую систему, на их радиусы-векторы, проведенные из этой точки, равна нулю.



- Центр тяжести твердого тела (центр тяжести) — центр параллельных сил тяжести, действующих на все частицы тела.

«Центр тяжести — геометрическая точка, неизменно связанная с твердым телом, через которую проходит равнодействующая сила всех сил тяжести, действующих на частицы тела при любом его положении в пространстве. Она может не совпадать ни с одной из точек тела (например, у кольца). Положение центра тяжести твердого тела в однородном поле тяжести совпадает с положением его центра масс» [72].

- Силовое поле — область пространства, в которой на помещенную материальную точку действует сила, зависящая от координат этой точки в рассматриваемой системе отсчета и от времени.
- Стационарное силовое поле — силовое поле, в котором действующие силы не зависят от времени.

\* Силовое поле, в котором действующие силы зависят от времени, называется нестационарным силовым полем.

- Однородное силовое поле — силовое поле, в любой точке которого сила поля для данной материальной точки имеет одно и то же значение.
- Силовая функция — скалярная функция координат и, может быть, времени, градиент которой равен силе, действующей на материальную точку, находящуюся в рассматриваемом силовом поле.
- Потенциальное силовое поле — силовое поле, для которого существует силовая функция.

### § 3.3

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СТАТИКИ

- Статика — раздел механики, в котором изучаются условия равновесия механических систем под действием сил.
- Равновесие механической системы (равновесие) — состояние механической системы, при котором все ее точки под действием приложенных сил остаются в покое по отношению к рассматриваемой системе отсчета.

\* Равновесие является частным случаем движения механической системы.

- Статически определимая механическая система — механическая система, у которой реакции всех наложенных связей могут быть определены из условий равновесия, получаемых в статике.

\* Механическая система, у которой реакции всех наложенных связей не могут быть найдены из условий равновесия, получаемых в статике, называется статически неопределимой механической системой.

- Уравновешенная система сил — система сил, которая, будучи приложенной к свободному твердому телу, находящемуся в покое, не выводит его из этого состояния.
- Уравновешивающая система сил — система сил, которая вместе с заданной другой системой сил составляет уравновешенную систему сил.
- Эквивалентные системы сил — две или несколько систем сил, имеющие одну и ту же уравновешивающую систему сил.

\* Системы сил будут эквивалентными, если у них равны главные векторы и главные моменты относительно одного и того же центра (любого).

- Приведение системы сил к данной точке — операция замены системы сил, действующих на абсолютно твердое тело, эквивалентной ей системой сил, состоящей из одной силы, приложенной в данной точке, и пары сил.

\* Эта точка называется *центром приведения*, а саму операцию можно именовать *приведением системы сил к данному центру*.

- Равнодействующая система сил (равнодействующая) — сила, эквивалентная данной системе сил.
- Динамический винт (силовой винт. Нрк. динама) — совокупность силы и пары сил, лежащей в плоскости, перпендикулярной этой силе.
- Центральная ось системы сил (центральная ось) — прямая, являющаяся геометрическим местом точек, при приведении к которым данная система сил образует динамический винт.
- Инварианты системы сил — величины, остающиеся неизменными при преобразовании данной системы сил в любую ей эквивалентную и равные главному вектору этой системы сил и проекции ее главного момента относительно любого центра на направление главного вектора.



\* Если главный вектор системы равен нулю, то вторым инвариантом является ее главный момент относительно любого центра.

● Центр параллельных сил — геометрическая точка, через которую проходит линия действия равнодействующей системы параллельных сил при любом повороте этих сил вокруг точек их приложения, оставляющем силы параллельными друг другу и сохраняющем их параллельность и взаимную ориентацию.

## Глава 4

### ТЕПЛОТА

#### § 4.1

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ<sup>1</sup>

##### Термодинамические системы

- Термодинамическая система — тело (совокупность тел), способное (способных) обмениваться с другими телами (между собой) энергией и (или) веществом.
- Открытая термодинамическая система — термодинамическая система, которая может обмениваться веществом с другими системами.
- Закрытая термодинамическая система — термодинамическая система, которая не может обмениваться веществом с другими системами.
- Изолированная термодинамическая система — термодинамическая система, которая не может обмениваться энергией и веществом с другими системами.
- Адиабатная термодинамическая система — термодинамическая система, которая не может обмениваться теплотой с другими системами.
- Гетерогенная термодинамическая система — термодинамическая система, состоящая из отдельных частей, разграниченных поверхностями раздела.

\* При переходе через поверхность раздела хотя бы одно термодинамическое свойство вещества изменяется скачкообразно.

● Гомогенная термодинамическая система — термодинамическая система, между любыми частями которой нет поверхностей раздела.

\* Гомогенная термодинамическая система, во всех частях которой свойства одинаковы, называется *однородной термодинамической системой*.

● Фаза — гомогенная часть гетерогенной термодинамической системы, ограниченная поверхностью раздела.

<sup>1</sup> Терминология и определения основных понятий теплоты соответствуют [55, 59].



● Конденсированная термодинамическая система — термодинамическая система, состоящая только из твердых и (или) жидких фаз.

● Многокомпонентная термодинамическая система — термодинамическая система, состоящая из двух (или более) индивидуальных веществ (компонентов термодинамической системы).

\* 1. Многокомпонентными термодинамическими системами являются, например, раствор, смесь, сплав.

2. Индивидуальное вещество — вещество, состоящее из частиц (молекул, атомов, ионов и т. п.) одинакового вида.

● Стационарное состояние — состояние термодинамической системы, при которой значения параметров (см. с. 10) во всех частях ее остаются неизменными во времени благодаря внешнему воздействию потоков вещества, энергии, импульса, заряда и т. п.

● Нестационарное состояние — состояние термодинамической системы, при котором значения параметров изменяются во времени.

● Равновесное состояние (равновесие) — состояние термодинамической системы, характеризующееся при постоянных внешних условиях неизменностью параметров во времени и отсутствием в системе потоков.

\* Состояние термодинамической системы, не удовлетворяющее данному определению, называется *неравновесным состоянием*.

● Уравнение состояния — уравнение, связывающее любой термодинамический параметр (любое термодинамическое свойство) системы с параметрами, принятыми в качестве независимых переменных.

\* Уравнение состояния, связывающее для однородного тела давление, объем и температуру, называется *термодинамическим уравнением состояния*.

● Нормальные термодинамические условия — температура  $0^\circ \text{C}$  и давление  $101\,325 \text{ Па}$ .

### Термодинамические процессы

● Термодинамический процесс — изменение состояния термодинамической системы, характеризующееся изменением ее параметров.

● Равновесный процесс — термодинамический процесс, представляющий собой непрерывную последовательность равновесных состояний.

● Неравновесный процесс — термодинамический процесс, представляющий собой последовательность со-

стояний, среди которых не все являются равновесными состояниями.

● Обратимый процесс — термодинамический процесс, после которого система и взаимодействующие с ней системы (окружающая среда) могут возвратиться в начальное состояние без того, чтобы в системе и окружающей среде возникали какие-либо остаточные изменения.

● Необратимый процесс — термодинамический процесс, после которого система и взаимодействующие с ней системы (окружающая среда) не могут возвратиться в начальное состояние без возникновения остаточных изменений в системе или окружающей среде.

● Изобарный процесс — термодинамический процесс, происходящий при постоянном давлении в системе.

● Изохорный процесс — термодинамический процесс, происходящий при постоянном объеме системы.

● Изотермический процесс — термодинамический процесс, происходящий при постоянной температуре системы.

● Адиабатный процесс — термодинамический процесс, в котором система не обменивается теплотой с окружающей средой.

● Изоэнтропный процесс — термодинамический процесс, происходящий при постоянной энтропии (см. с. 99) системы.

● Политропный процесс — термодинамический процесс, удовлетворяющий соотношению

$$pv^n = \text{const},$$

где  $n$  — показатель политропы (величина постоянная).

● Изохнтальный процесс — термодинамический процесс, происходящий при постоянной энтальпии (см. с. 98) системы.

● Дросселирование — необратимый термодинамический процесс перетекания газа (жидкости) от большего давления к меньшему, происходящий без отдачи работы вовне.

● Адиабатное дросселирование — дросселирование, протекающее без теплообмена с окружающей средой.

● Изотермическое дросселирование — дросселирование, протекающее при теплообмене с окружающей средой, в результате которого конечная температура газа (жидкости) становится равной начальной.



- Фазовый переход — термодинамический процесс перехода вещества из одной фазы в другую.
- Фазовый переход первого рода — фазовый переход, при котором претерпевают скачки первые производные от химического потенциала (см. с. 215).
- Фазовый переход второго рода — фазовый переход, при котором первые производные от химического потенциала непрерывны, но претерпевают скачки его вторые производные.
- Парообразование — фазовый переход вещества из жидкого состояния в состояние пара.
- Конденсация — фазовый переход вещества из парообразного состояния в жидкое (или кристаллическое).
- Сублимация — фазовый переход вещества из кристаллического состояния непосредственно в парообразное.
- Десублимация — фазовый переход вещества из газообразного состояния в кристаллическое.
- Кристаллизация — фазовый переход вещества из жидкой или газовой фазы в кристаллическую фазу.
- Плавление — фазовый переход вещества из кристаллического состояния в жидкое.
- Полиморфный переход (полиморфное превращение) — фазовый переход вещества из одной кристаллической или жидкокристаллической модификации в другую.
- Теплообмен — самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты (см. с. 94) в пространстве с неоднородным полем температуры.

\* 1. Под процессом переноса теплоты здесь понимается процесс обмена внутренней энергией между элементами системы.

2. Процесс переноса теплоты в общем случае может вызываться также неоднородностью полей других физических величин, например разностью концентраций (см. с. 211).

- Молекулярный перенос теплоты — перенос теплоты посредством теплового движения микрочастиц в среде с неоднородным распределением температуры, концентрации, скорости.
- Теплоноситель — движущаяся среда, используемая для переноса теплоты.
- Теплопроводность — молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры (см. с. 93).
- Теплообмен излучением (радиационный теплообмен) — теплообмен, обусловленный превращением вну-

тренней энергии вещества в энергию излучения, переносом излучения и его поглощением веществом.

- Изотермическая поверхность — поверхность, во всех точках которой температура одинакова.
- Температурный напор — разность температур среды и стенки (или границы раздела фаз) или двух сред, между которыми происходит теплообмен.
- Теплоотдача — теплообмен между движущейся средой и поверхностью ее раздела с другой средой (твердым телом, жидкостью, газом).
- Теплопередача — теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку или через поверхность раздела между ними.
- Диссипация энергии — необратимое преобразование кинетической энергии в теплоту, обусловленную работой неконсервативных сил.

### Термодинамические циклы

- Термодинамический цикл — непрерывная последовательность термодинамических процессов, в результате которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.
- Прямой термодинамический цикл — термодинамический цикл, в котором к рабочему телу подводится большее количество теплоты при большей температуре и отводится меньшее количество теплоты при более низкой температуре, разность же этих теплот равна совершенной работе.
- Обратный термодинамический цикл — термодинамический цикл, в котором к рабочему телу подводится меньшее количество теплоты и при меньшей температуре, а отводится большее количество теплоты и при более высокой температуре, разность же этих теплот равна затраченной работе.
- Обратимый термодинамический цикл — термодинамический цикл, все процессы в котором обратимы.
- Необратимый термодинамический цикл — термодинамический цикл, в котором хотя бы один из составляющих его процессов необратим.
- Цикл Карно — обратимый термодинамический цикл, состоящий из двух изоэнтропных и двух изотермических процессов.
- Регенеративный термодинамический цикл — термодинамический цикл, в котором осуществляется отвод



теплоты от рабочего тела в одном или нескольких процессах цикла для подвода ее к рабочему телу в одном или нескольких других процессах этого цикла.

- Бинарный термодинамический цикл — совокупность двух термодинамических циклов, осуществляемых двумя рабочими телами так, что теплота, отводимая в одном цикле, используется в другом цикле.
- Источник теплоты — термодинамическая система, способная отдавать или воспринимать теплоту и характеризующаяся определенной неизменной температурой.

## § 4.2

### ТЕПЛОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ<sup>1</sup>

- Термодинамический параметр — одна из совокупностей физических величин, характеризующих термодинамическую систему.
- Экстенсивный термодинамический параметр — термодинамический параметр, пропорциональный количеству вещества (см. с. 205) или массе данной термодинамической системы. Экстенсивными параметрами являются, например, внутренняя энергия, энтропия, энергия Гельмгольца и др.
- Интенсивный термодинамический параметр — термодинамический параметр, не зависящий от количества вещества или от массы термодинамической системы. Интенсивными термодинамическими параметрами являются, например, термодинамическая температура, давление, концентрация, молярные и удельные термодинамические величины.
- Термодинамическая температура — одна из семи основных величин Международной системы единиц. Поэтому размерность и единица термодинамической температуры, как и всех остальных основных величин, выбраны произвольно:

$$\dim T = \Theta, [T] = 1 \text{ К.}$$

Кельвин равен  $1/273,16$  термодинамической температуры тройной точки воды [XIII ГКМВ (1967). Резолюция 4].

<sup>1</sup> Терминология и определения тепловых величин и термодинамических параметров соответствуют [53, 55, 59], определения единиц тепловых величин — [53].

- Термодинамическая температура  $T$  — температура, отсчитываемая по термодинамической шкале температур от абсолютного нуля.

Термодинамическая температурная шкала основывается на втором начале термодинамики, из которого следует, что для любого рабочего тела (независимо от природы), совершающего цикл Карно, отношение количества теплоты  $Q_1$ , полученного телом от теплоотдатчика, к количеству теплоты  $Q_2$ , отданному теплоприемнику, равно отношению температуры  $T_1$  теплоотдатчика к температуре  $T_2$  теплоприемника:

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2. \quad (4.1)$$

Если выбрать на температурной шкале одну реперную точку (постоянную точку), произвольно приписав ей температуру  $T_0$ , и провести цикл Карно, причем один из резервуаров теплоты (например, теплоотдатчик) имел бы температуру  $T_0$ , а другой (теплоприемник) — температуру  $T$ , то на основании (4.1) можно определить любую температуру  $T$ , измерив предварительно количества теплоты  $Q_1$  и  $Q_2$ .

Построенная таким образом температурная шкала называется термодинамической.

В качестве единственной реперной точки термодинамической температурной шкалы взята тройная точка воды (вторая реперная точка — точка абсолютного нуля).

Выясним, почему в качестве реперной точки выбрана тройная точка воды, а не точка кипения воды, как это, например, сделано при построении шкалы Цельсия, или не точка плавления льда, как это сделано в температурной шкале Реомюра.

На рис. 4.1 изображена (без соблюдения масштаба) диаграмма состояния воды в координатах  $pT$ . Кривые I, II и III делят всю область на твердую, жидкую и газообразную фазы. Кривая I (кривая таяния льда) характеризует состояние равновесия твердой и жидкой фаз. Каждая точка этой кривой определяет температуру таяния льда

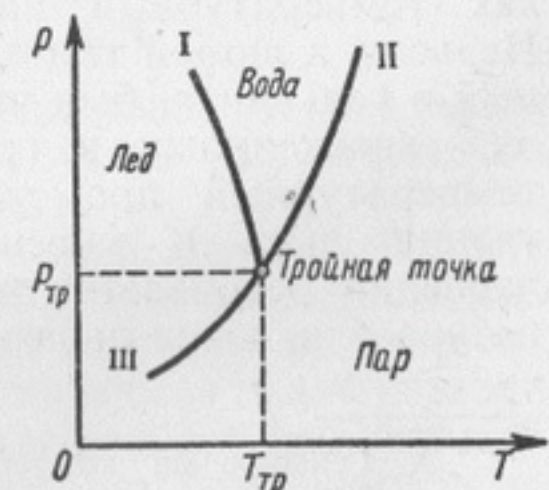


Рис. 4.1. К понятию «тройная точка воды»



при данном давлении. Кривая II (кривая давления пара) характеризует состояние равновесия жидкой и газообразной фаз и выражает зависимость температуры кипения воды от давления. Кривая III—это кривая сублимации (возгонки), т. е. перехода вещества из кристаллического состояния непосредственно (без плавления) в газообразное.

Точка O, в которой пересекаются все кривые I, II, III, и есть тройная точка воды. В этой точке сосуществуют в равновесии все три фазы воды. Тройная точка в отличие от точек кипения и плавления характеризуется единственным значением температуры. Температура эта не может зависеть от давления, так как и давление в тройной точке воды тоже имеет единственное значение. Этим тройная точка в качестве реперной выгодно отличается от точек кипения воды и таяния льда, при выборе которых в качестве реперных необходимо указывать значение давления.

Единственность значения температуры тройной точки воды и определило выбор ее в качестве реперной точки при построении термодинамической температурной шкалы. Однако при этом имело значение также и то, что температура тройной точки воды может быть найдена с большей точностью, чем температура кипения воды и температура таяния льда.

Тройной точке воды соответствуют температура  $T=273,16$  К (точно)<sup>1</sup> и давление  $p=609$  Па.

Единица термодинамической температуры—кельвин—выбрана так, чтобы была преобладающей стоградусной шкалой Цельсия, т. е. чтобы кельвин, как температурный интервал, был равен градусу Цельсия, а любой температурный интервал, выраженный в кельвинах, был численно равен этому интервалу, выраженному в градусах Цельсия. Для этого температурный промежуток между температурами таяния льда и кипения воды при нормальном давлении разбивается на 100 равных частей. Температура плавления льда на 0,01 градуса ниже темпера-

<sup>1</sup> X Генеральная конференция по мерам и весам (1954) постановила: «Термодинамическая температура тройной точки воды содержит точно 273,16 кельвин (К)». Название это введено в честь Томсона (лорда Кельвина).

туры тройной точки. Следовательно, по термодинамической шкале температура плавления льда равна 273,15 К.

Как уже указывалось, термодинамическая шкала строится на одной реперной точке. Нижним пределом шкалы является абсолютный нуль. Исходя из этого кельвин определяется как  $1/273,16$  температурного интервала между тройной точкой воды и 0 К.

Измерение температуры по термодинамической шкале связано с осуществлением цикла Карно и измерением количеств теплоты, получаемых телом от нагревателя и отдаваемых охладителю. Измерение температуры, таким образом, являлось бы затруднительным. В связи с этим для практических целей на основе термодинамической шкалы установлена Международная практическая температурная шкала (см. Приложение 4).

Термодинамическая температура, определяемая по этой шкале, обозначается  $T_{68}$  и рассматривается в настоящее время как наибольшее приближение к термодинамической температуре  $T$ .

Рекомендуемые кратные и дольные единицы термодинамической температуры: МК, кК, мК, мкК.

● Температура Цельсия  $t$ —температура, определяемая соотношением

$$t = T - T_0,$$

где  $T_0$ —термодинамическая температура, которая по определению ниже термодинамической температуры тройной точки воды на 0,01 К, т. е.  $T_0=273,15$  К.

Размерность и единица температуры Цельсия:

$$\dim t = \Theta, [t] = 1^\circ\text{C}.$$

Градус Цельсия—это специальное наименование для единицы кельвин, используемое для выражения значений температуры Цельсия.

Как температурный интервал градус Цельсия равен кельвину ( $1^\circ\text{C} = 1$  К). Следовательно, единицы интервала термодинамической температуры и интервала температуры Цельсия являются идентичными. Генеральная конференция по мерам и весам рекомендовала такие интервалы или разность температур выражать в кельвинах (К) или в градусах Цельсия ( $^\circ\text{C}$ ). Другие наименования и обозначения, такие,



как «degre», «deg» или «degree», — запретить («МПТШ-68»).

Температура Цельсия, определенная по шкале МПТШ-68, указывается как  $t_{68}$  и рассматривается в настоящее время как наибольшее приближение к температуре Цельсия  $t$ .

● Шкала Реомюра — температурная шкала, в которой реперными точками являются температура таяния льда ( $0^{\circ}\text{R}$ ) и температура кипения воды ( $80^{\circ}\text{R}$ ); размер градуса ( $^{\circ}\text{R}$ ) определяется как восьмидесятая часть температурного интервала между этими реперными точками.

Шкала предложена французским ученым Р. А. Реомюром в 1730 г.; в настоящее время практически вышла из употребления.

Соотношение между градусом Реомюра и градусом Цельсия:

$$1^{\circ}\text{R} = 5/4^{\circ}\text{C}.$$

Перевод температуры по шкале Реомюра ( $t_{\text{R}}$ ) в температуру по шкале Цельсия ( $t$ ) осуществляется по формуле

$$t_{\text{R}} = 4/5 t.$$

● Шкала Фаренгейта — температурная шкала, в которой температурный интервал между точками таяния льда и кипения воды (при нормальном давлении) разделен на сто частей — градусов Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ), причем точке таяния льда присвоено значение  $32^{\circ}\text{F}$ , а точке кипения воды  $212^{\circ}\text{F}$ .

Шкала предложена в 1724 г. немецким физиком Фаренгейтом. Традиционно применяется в ряде стран (в частности, в США).

Соотношение между градусом Фаренгейта и градусом Цельсия:

$$1^{\circ}\text{F} = 5/9^{\circ}\text{C}.$$

Перевод температуры по шкале Фаренгейта в температуру по шкале Цельсия осуществляется по формуле

$$t = 5/9 (f - 32),$$

где  $t$  — температура Цельсия,  $f$  — температура Фаренгейта.

● Шкала Ренкина — температурная шкала, в которой размер градуса равен градусу Фаренгейта, но отсчет ведется от абсолютного нуля температуры.

По шкале Ренкина  $0^{\circ}\text{F}$  равен  $459,67^{\circ}\text{Ra}$ , точка таяния льда  $491,67^{\circ}\text{Ra}$  и точка кипения воды  $671,67^{\circ}\text{Ra}$ .

Перевод температуры Ренкина в температуру Цельсия осуществляется по уравнению

$$t = 5/9 F - 273,15,$$

где  $t$  — температура Цельсия,  $F$  — температура Ренкина.

Перевод температуры Ренкина в термодинамическую температуру осуществляется по уравнению

$$T = 5/9 F,$$

где  $T$  — термодинамическая температура.

Шкала Ренкина сохраняется в США и в некоторых странах, где принято измерение температуры в градусах Фаренгейта.

● Температурный коэффициент относительного изменения физической величины  $\alpha$ ,  $\beta$  — величина, равная отношению относительного изменения  $dX/X_0$  физической величины  $X$  к изменению  $dT$  температуры, вызвавшему это изменение данной физической величины:

$$\alpha = \frac{dX/X_0}{dT} = dX/(X_0 dT).$$

Размерность и единица температурного коэффициента:

$$\dim \alpha = \Theta^{-1}, [\alpha] = 1 \text{ K}^{-1}.$$

Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту относительного изменения физической величины, при котором изменение температуры на 1 К от принятой за начальную вызывает относительное изменение этой величины, равное единице.

\* Примерами температурного коэффициента являются величины: температурный коэффициент линейного расширения, температурный коэффициент объемного расширения, температурный коэффициент давления и т. п.

● Температурный градиент  $\text{grad } T$  — вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равный частной производной от температуры по этому направлению  $x$ :

$$\text{grad } T = (dT/dx)i,$$



где  $\mathbf{i}$  — единичный вектор оси  $Ox$ .

В случае равномерного изменения температуры в направлении температурного градиента эта формула примет вид

$$\text{grad } T = (\Delta T / \Delta x) \mathbf{i}.$$

Размерность и единица температурного градиента:

$$\dim \text{grad } T = L^{-1} \Theta, [\text{grad } T] = 1 \text{ К/м}.$$

Кельвин на метр равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К.

● Количество теплоты (теплота, тепло<sup>1</sup>)  $Q$  — энергия, передаваемая более нагретым телом менее нагретому телу, не связанная с переносом вещества и совершением работы.

Размерность и единица количества теплоты:

$$\dim Q = L^2 MT^{-2}, [Q] = 1 \text{ Дж}.$$

Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы количества теплоты: ТДж, ГДж, МДж, кДж, мДж.

● Тепловой поток  $\Phi$  — величина, равная отношению количества теплоты  $dQ$ , прошедшего через некоторую поверхность, к интервалу времени  $dt$ , за который прошло это количество теплоты:

$$\Phi = dQ/dt.$$

Размерность и единица теплового потока:

$$\dim \Phi = \frac{\dim Q}{\dim t} = \frac{L^2 MT^{-2}}{T} = L^2 MT^{-3},$$

$$[\Phi] = [Q]/[t] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}.$$

Ватт равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Рекомендуемые кратная и дольная единицы теплового потока: кВт, мВт.

● Поверхностная плотность теплового потока (плотность теплового потока)  $q$  — векторная величина,

<sup>1</sup> Термины «теплота», «количество теплоты» рекомендованы [53]. Термин «тепло» стандартизован для использования в теплоэнергетике [ГОСТ 19431—84].

равная отношению теплового потока  $d\Phi$  к площади  $dS$  поверхности, через которую проходит этот поток:

$$q = d\Phi/dS \mathbf{n},$$

где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор, сонаправленный с перемещением теплоты.

Размерность и единица поверхностной плотности теплового потока:

$$\dim q = \frac{\dim \Phi}{\dim S} = \frac{L^2 MT^{-3}}{L^2} = MT^{-3},$$

$$[q] = \frac{1 \text{ Вт}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности теплового потока, при которой поток 1 Вт равномерно распределен по поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>.

● Коэффициент теплопроводности<sup>1</sup> (теплопроводность)  $\lambda$  — физическая величина, характеризующая интенсивность процесса теплопроводности в веществе и численно равная плотности теплового потока вследствие теплопроводности при градиенте температуры, равном единице.

Теплопроводность в качестве коэффициента пропорциональности между плотностью теплового потока и градиентом температуры входит в закон Фурье:

$$q = -\lambda \text{ grad } T,$$

где  $q$  — плотность теплового потока.

Отсюда получим

$$\lambda = q/|\text{grad } T|.$$

Размерность и единица теплопроводности:

$$\dim \lambda = \frac{\dim q}{\dim |\text{grad } T|} = \frac{MT^{-3}}{L^{-1} \Theta} = LMT^{-3} \Theta^{-1},$$

$$[\lambda] = \frac{[q]}{[\text{grad } T]} = \frac{1 \text{ Вт/м}^2}{1 \text{ К/м}} = 1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Ватт на метр-кельвин равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме

<sup>1</sup> Термин «коэффициент теплопроводности» рекомендован [59]. В [53] рекомендуется термин «теплопроводность».



с поверхностной плотностью теплового потока  $1 \text{ Вт/м}^2$  устанавливается температурный градиент  $1 \text{ К/м}$ .

\* Теплопроводность анизотропного вещества зависит от направления из данной точки и достигает экстремальных значений по трем взаимно ортогональным направлениям, называемым главными осями тепловой проводимости.

● Коэффициент теплопередачи  $k$  — физическая величина, характеризующая интенсивность теплопередачи и равная отношению плотности теплового потока на стенке (поверхности раздела) к температурному напору между теплоносителями.

Коэффициент теплопередачи выразим из формулы стационарного теплового потока  $\Phi$  через плоскую стенку:

$$\Phi = kS\Delta T,$$

где  $S$  — площадь поверхности,  $\Delta T$  — разность температур двух сред, разделяемых стенкой.

Отсюда найдем

$$k = \frac{\Phi}{S\Delta T} = \frac{q}{\Delta T},$$

где  $q$  — модуль плотности теплового потока.

Размерность и единица коэффициента теплопередачи:

$$\dim k = \dim q / \dim T = \text{МТ}^{-3}/\Theta = \text{МТ}^{-3}\Theta^{-1},$$

$$[k] = [q]/[T] = 1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

*Ватт на квадратный метр-кельвин* равен коэффициенту теплопередачи, соответствующему поверхностной плотности теплового потока  $1 \text{ Вт/м}^2$  при разности температур  $1 \text{ К}$ .

\* В ваттах на квадратный метр-кельвин выражается также коэффициент теплообмена.

● Теплоемкость тела (системы)  $C$  — величина, равная производной от количества теплоты по температуре в каком-либо термодинамическом процессе:

$$C_x = (dQ_x/dT)_x. \quad (4.2)$$

\* В изохорном процессе — «изохорная теплоемкость»  $C_V$ , в изобарном процессе — «изобарная теплоемкость»  $C_p$ .

Размерность и единица теплоемкости:

$$\dim C_x = \dim Q / \dim T = \text{Л}^2 \text{МТ}^{-2} / \Theta = \text{Л}^2 \text{МТ}^{-2} \Theta^{-1},$$

$$[C_x] = [Q]/[T] = 1 \text{ Дж/К}.$$

*Джоуль на кельвин* равен теплоемкости системы, температура которой повышается на  $1 \text{ К}$  при подведении к системе количества теплоты  $1 \text{ Дж}$ .

Рекомендуемая кратная единица теплоемкости — кДж/К.

● Показатель адиабаты (коэффициент Пуассона)  $\gamma$  — безразмерная величина, равная отношению молярной теплоемкости  $C_p$  идеального газа при постоянном давлении к молярной теплоемкости  $C_V$  этого газа при постоянном объеме:

$$\gamma = C_p / C_V.$$

Показатель адиабаты входит в качестве показателя степени, в которую возводится объем газа в уравнении газового состояния (уравнении Пуансона), для адиабатного газового процесса:

$$pV^\gamma = \text{const}.$$

Показатель адиабаты как безразмерная величина выражается в безразмерных единицах.

● Характеристическая функция — функция состояния термодинамической системы соответствующих параметров, характеризующаяся тем, что посредством этой функции и производных ее по этим параметрам могут быть выражены в явном виде все термодинамические свойства системы.

Наиболее часто используются в термодинамике следующие характеристические функции: энтропия, внутренняя энергия, энтальпия, энергия Гельмгольца, энергия Гиббса.

● Термодинамический потенциал — характеристическая функция, убыль которой в равновесном процессе, протекающем при постоянстве значений соответствующих независимых параметров, равна полезной внешней работе.

Наиболее часто используются в термодинамике следующие термодинамические потенциалы: внутренняя энергия, энтальпия, энергия Гельмгольца, энергия Гиббса.

● Внутренняя энергия  $U$  — функция состояния закрытой термодинамической системы, определяемая тем, что ее приращение в любом процессе, происходящем в этой системе, равно сумме теплоты, сообщенной системе, и работы, совершенной над ней:

$$U = Q + A.$$



Внутренняя энергия является характеристической функцией, если энтропия и объем являются независимыми переменными.

По своей природе внутренняя энергия системы — это кинетическая энергия составляющих систему молекул, атомов, свободных электронов и других микрочастиц и потенциальной энергии взаимодействия частиц. Внутренняя энергия идеального газа состоит только из кинетической энергии частиц.

Внутренняя энергия, как и любая другая энергия, имеет размерность  $L^2MT^{-2}$  и выражается в джоулях.

• Энтальпия  $H$  — функция состояния термодинамической системы, равная сумме внутренней энергии и произведения объема на давление:

$$H = U + pV. \quad (4.3)$$

Энтальпия является характеристической функцией, если энтропия и давление являются независимыми параметрами.

Из определяющего уравнения (4.3) следует, что энтальпия имеет размерность  $L^2MT^{-2}$  и выражается в джоулях.

• Энергия Гельмгольца<sup>1</sup>  $A$  — функция состояния термодинамической системы, равная разности между внутренней энергией и произведением термодинамической температуры на энтропию:

$$A = U - TS. \quad (4.4)$$

Энергия Гельмгольца является характеристической функцией, если объем и термодинамическая температура являются независимыми переменными.

Из (4.4) найдем, что энергия Гельмгольца имеет размерность  $L^2MT^{-2}$  и выражается в джоулях.

• Энергия Гиббса  $G$  — функция состояния термодинамической системы, равная разности между энтальпией и произведением термодинамической температуры на энтропию.

Энергия Гиббса является характеристической функцией, если давление и термодинамическая температура являются независимыми параметрами.

<sup>1</sup> Термин «энергия Гельмгольца» рекомендован [59]; в [53] используется термин «изохорно-изотермический потенциал»; в [72] указывается, что эта величина называется также «свободной энергией». В [34] рекомендовано обозначение  $F$ .

Из определения энергии Гиббса следует, что эта величина имеет размерность  $L^2MT^{-2}$  и выражается в джоулях.

• Энтропия  $S$  — функция состояния термодинамической системы, определяемая тем, что ее дифференциал  $dS$  при элементарном равновесном обратимом процессе равен отношению бесконечно малого количества теплоты  $dQ$ , сообщенного системе, к термодинамической температуре  $T$  системы:

$$dS = dQ/T.$$

Если система перешла из состояния 1 в состояние 2, то

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Для процессов, протекающих при некоторой средней температуре, эта формула после интегрирования примет вид

$$\Delta S = \Delta Q / \langle T \rangle. \quad (4.5)$$

Отсюда найдем размерность энтропии:

$$\dim S = \dim Q / \dim T = L^2MT^{-2} / \Theta = L^2MT^{-2}\Theta^{-1}.$$

Положив в (4.5)  $\Delta Q = n$  Дж,  $\langle T \rangle = n$  К, где  $n$  — положительное число, получим единицу энтропии:

$$[S] = [Q] / [T] = 1 \text{ Дж/К}.$$

Джоуль на кельвин равен изменению энтропии системы, которой при температуре  $n$  К в изотермическом процессе сообщается количество теплоты  $n$  Дж.

Рекомендуемая кратная единица энтропии — кДж/К.

В изолированных системах при любых обратимых процессах энтропия не изменяется, при необратимых — возрастает.

В соответствии со вторым началом термодинамики в изолированных системах самопроизвольно могут совершаться только такие процессы, при которых энтропия системы возрастает и процесс может идти самопроизвольно только до такого состояния, при котором энтропия обладает максимальным для данных условий значением.



• Термический коэффициент полезного действия термодинамического цикла  $\eta_t$ ,  $\eta_T$  — отношение работы, совершенной в прямом обратном термодинамическом цикле, к теплоте, сообщенной рабочему телу от внешних источников:

$$\eta_t = A/Q.$$

Из этого уравнения следует, что термический коэффициент полезного действия термодинамического цикла — величина безразмерная и выражается в относительных единицах:

$$\dim \eta_t = 1, \quad [\eta] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Дж}} = 1.$$

• Холодильный коэффициент — отношение теплоты, отведенной в обратном термодинамическом цикле от охлаждаемой системы, к работе, затрачиваемой в этом цикле:

$$\xi = Q/A.$$

Холодильный коэффициент — величина безразмерная и выражается в относительных единицах.

• Отопительный коэффициент  $\psi$  — величина, равная отношению теплоты, сообщенной в обратном термодинамическом цикле нагреваемой системе, к работе, затраченной в этом цикле.

Отопительный коэффициент — величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах.

• Эксергия (работоспособность)  $E$  — максимальная работа, которую может совершить термодинамическая система при обратимом переходе от данного состояния до равновесного с окружающей средой при отсутствии иных, кроме окружающей среды, источников теплоты.

Из этого определения следует, что эксергия имеет размерность  $L^2MT^{-2}$  и выражается в джоулях.

• Удельная термодинамическая величина  $x$  — величина, равная отношению экстенсивного термодинамического параметра  $dX$  системы к массе  $dm$  этой системы:

$$x = \frac{dX}{dm}.$$

Размерность и единица удельной термодинамической величины:

$$\dim x = \frac{\dim X}{\dim m}, \quad [x] = \frac{[X]}{[m]}.$$

\* Удельными термодинамическими величинами являются, например, удельная теплоемкость, удельная внутренняя энергия, удельная энтропия и др.

• Удельное количество теплоты  $q$  — величина, равная отношению количества теплоты  $Q$ , полученного или отданного однородной системой, к массе  $m$  этой системы:

$$q = \frac{Q}{m}.$$

Размерность и единица удельного количества теплоты:

$$\dim q = L^2T^{-2}, \quad [q] = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Джоуль на килограмм равен удельному количеству теплоты системы, в которой веществу массой 1 кг сообщается (или отбирается от него) количество теплоты 1 Дж.

Рекомендуемые кратные единицы удельного количества теплоты: МДж/кг; кДж/кг.

\* В джоулях на килограмм выражаются также величины: удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции, удельный термодинамический потенциал, удельная теплота сгорания топлива.

• Удельная теплоемкость  $c$  — величина, равная отношению теплоемкости системы к ее массе:

$$c = \frac{dC}{dm}.$$

В случае однородной системы эта формула примет вид

$$c = \frac{C}{m}.$$

Размерность и единица удельной теплоемкости:

$$\dim c = \frac{\dim C}{\dim m} = \frac{L^2MT^{-2}\Theta^{-1}}{M} = L^2T^{-2}\Theta^{-1},$$

$$c = \frac{1 \text{ Дж/К}}{1 \text{ кг}} = 1 \text{ Дж (кг·К)}.$$

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К.



Рекомендуемая кратная единица удельной теплоемкости — кДж/(кг·К).

- Удельная энтропия  $s$  — величина, равная отношению энтропии системы к ее массе. Если в результате некоторого процесса в однородной системе массой  $m$  произошло изменение энтропии на  $\Delta S$ , то изменение удельной энтропии

$$\Delta s = \Delta S / m.$$

Размерность и единица удельной энтропии:

$$\dim s = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}, \quad [s] = 1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Джоуль на килограмм-кельвин равен изменению удельной энтропии вещества, в котором при массе 1 кг изменение энтропии составляет 1 Дж/К.

Рекомендуемая кратная единица удельной энтропии — кДж/(кг·К).

- Температуропроводность  $a$  — величина, характеризующая скорость изменения температуры вещества в нестационарных тепловых процессах и равная отношению коэффициента теплопроводности  $\lambda$  вещества к произведению его удельной теплоемкости при постоянном давлении  $c_p$  на плотность  $\rho$ :

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}.$$

Размерность и единица температуропроводности:

$$\dim a = \frac{L M T^{-3} \Theta^{-1}}{L^2 T^{-2} \Theta^{-1} L^{-3} M} = L^2 T^{-1},$$

$$[a] = \frac{1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})}{1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 1 \text{ кг}/\text{м}^3} = 1 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Квадратный метр на секунду равен температуропроводности вещества с теплопроводностью 1 Вт/(м·К), удельной теплоемкостью (при постоянном давлении) 1 Дж/(кг·К) и плотностью 1 кг/м<sup>3</sup>.

## Глава 5

### ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

#### § 5.1

#### ЭЛЕКТРОСТАТИКА

#### Основные понятия<sup>1</sup>

- Элементарный электрический заряд — свойство электрона или протона, характеризующее их взаимосвязь с собственным электрическим полем и их взаимодействие с внешним электрическим полем, определяемое для электрона и протона числовыми значениями, равными по размеру, но противоположными по знаку.

\* Условно отрицательный знак приписывается заряду электрона, а положительный знак — заряду протона.

- Носитель заряда — частица, содержащая один или несколько элементарных электрических зарядов.

\* Носителем заряда является, например, электрон, протон; термин относится условно также к дырке в полупроводнике.

- Электрический заряд тела (системы тела) — скалярная величина, равная алгебраической сумме элементарных электрических зарядов в теле (системе тел) (см. также с. 106).

- Электростатическое поле — электрическое поле неподвижных заряженных тел при отсутствии в них электрических токов.

- Стационарное электрическое поле — электрическое поле неизменяющихся электрических токов при условии неподвижности проводников с токами.

- Индуцированное электрическое поле — электрическое поле, возбуждаемое изменением во времени магнитного поля.

- Стороннее поле — поле сторонних сил.

\* Сторонняя сила — сила, действующая на заряженную частицу, обусловленная неэлектромагнитными при макроскопическом

<sup>1</sup> Терминология и определения понятий, приведенных ниже, соответствуют [21, 22].



рассмотрении процессами. К таким процессам следует относить, например, тепловые процессы, химические реакции, воздействия механических сил, контактные явления и т. п.

- Электрический диполь — совокупность двух равных по размеру разноименных точечных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Основной характеристикой электрического диполя является электрический момент (см. с. 111).
- Электрическая поляризация — состояние вещества, характеризующееся тем, что электрический момент данного объема этого вещества имеет значение, отличное от нуля.
- Диэлектрик — вещество, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле (см. также с. 280).
- Диэлектрические свойства (нрк. электроизоляционные свойства) — совокупность свойств диэлектрика, связанных с явлением поляризации.
- Полярный диэлектрик — диэлектрик, содержащий электрические диполи, способные к переориентации во внешнем электрическом поле.
- Неполярный диэлектрик — диэлектрик, не содержащий способные к переориентации во внешнем электрическом поле электрические диполи.
- Электронная поляризация — электрическая поляризация, обусловленная упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер в диэлектрике.
- Ионная поляризация — электрическая поляризация, обусловленная упругим смещением разноименно заряженных ионов относительно положения равновесия в диэлектрике.
- Дипольная поляризация (нрк. ориентационная поляризация, релаксационная поляризация, тепловая поляризация) — электрическая поляризация, обусловленная преимущественной ориентацией электрических моментов диполей в одном направлении в диэлектрике.
- Спонтанная поляризация — электрическая поляризация, возникающая в диэлектрике самопроизвольно, без внешних воздействий.
- Доменная поляризация (нрк. спонтанная поляризация) — электрическая поляризация, возникающая в диэлектрике под действием механических напряжений.

● Пробой (нрк. диэлектрический пробой) — явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля.

● Сегнетоэлектрик (нрк. ферроэлектрик) — диэлектрик, обладающий спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешним воздействием (см. также с. 286).

● Ионный сегнетоэлектрик (нрк. сегнетоэлектрик типа смещения) — сегнетоэлектрик, спонтанная поляризация которого является следствием смещения ионов кристаллической решетки из положений равновесия, в которых дипольный момент равен нулю.

● Дипольный сегнетоэлектрик (нрк. полярный сегнетоэлектрик. Сегнетоэлектрик типа порядок — беспорядок) — сегнетоэлектрик, спонтанная поляризация которого является следствием упорядочения в ориентации электрических диполей.

● Антисегнетоэлектрик — диэлектрик, самопроизвольно переходящий при определенной температуре в такое состояние с упорядоченным распределением диполей, что спонтанная поляризованность остается равной нулю.

\* Различают ионные, дипольные и несобственные антисегнетоэлектрики.

● Сегнетоэлектрическая точка Кюри (нрк. температура Кюри — Вейсса) — температура сегнетоэлектрического фазового перехода.

● Диэлектрический гистерезис — неоднозначная зависимость поляризованности диэлектрика от напряженности внешнего электрического поля при его периодическом изменении.

● Сегнетоэлектрический домен (домен) — область в сегнето- или антисегнетоэлектрике, имеющая пространственно однородное упорядочение дипольных моментов элементарных кристаллических ячеек.

● Коэрцитивная сила сегнетоэлектрика (нрк. коэрцитивное поле) — напряженность электрического или магнитного поля или механическое напряжение, необходимая (ое) для переориентации диэлектрических доменов.

● Пьезоэлектрик — диэлектрик, обладающий пьезоэлектрическим эффектом.

\* Пьезоэлектрический эффект — явление поляризации диэлектрика под воздействием механических напряжений (прямой пьезоэффект) или явление деформации диэлектрика под воздействием



электрического поля, линейно зависящей от напряженности этого поля (обратный пьезоэффект).

● Пирозлектрик — диэлектрик, обладающий пирозлектрическим эффектом.

\* Пирозлектрический эффект — явление возникновения электрических зарядов на поверхности диэлектрика при изменении его температуры.

● Электрет — диэлектрик, длительно создающий в окружающем пространстве электростатическое поле за счет предварительной электризации или поляризации.

### Электростатические величины<sup>1</sup>

● Количество электричества (электрический заряд)  $Q$  — величина, равная интегралу силы электрического тока (см. с. 117) по времени:

$$Q = \int I dt.$$

В случае постоянного тока эта формула принимает вид

$$Q = I \Delta t.$$

Размерность и единица количества электричества:

$$\dim Q = TI, \quad Q = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} \text{ (ампер-секунда)}.$$

Этой единице присвоено наименование — кулон (Кл).

Кулон равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение при неизменной силе тока 1 А за время 1 с.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы количества электричества: кКл, мкКл, нКл, пКл. В некоторых случаях применяется единица количества электричества — ампер-час (А·ч);  $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ кКл}$ .

\* В систематических курсах физики всегда сначала рассматривается электрический заряд, а затем в качестве производной величины вводится сила тока. Так, в [28] читаем: «Силой тока называется физическая величина  $I$ , равная отношению электрического заряда  $dQ$ , переносимого через рассматриваемую поверхность  $S$  за малый промежуток времени  $dt$ , к величине этого промежутка:  $I = dQ/dt$ . Это логично. Ведь из двух физических величин — электрического заряда и силы тока — по своему физическому смыслу «более первой» величиной является электрический заряд, а не сила тока.

<sup>1</sup> Терминология, определения и обозначения электростатических величин и других понятий соответствуют [9, 16, 21, 53].

Но при построении Международной системы единиц основной электромагнитной величиной была избрана сила тока. Поэтому электрический заряд как производная величина системы величин определяется через силу тока. Будем рассматривать это как издержку построения системы единиц. Впрочем, выбрав в качестве основной величины Международной системы единиц не силу тока, а другую электромагнитную величину, творцы этой системы столкнулись бы с иными, может быть, более серьезными трудностями. Не вдаваясь в подробности рассмотрения этого вопроса, отметим, что при выборе силы тока в качестве основной величины СИ учитывалось, что единицу силы тока (ампер) можно определить с меньшей относительной погрешностью, чем единицу других электромагнитных величин.

● Пространственная плотность электрического заряда (плотность заряда)  $\rho$  — величина, равная отношению заряда  $dQ$  к объему  $dV$ , в котором распределен этот заряд:

$$\rho = \frac{dQ}{dV}.$$

В случае равномерного распределения заряда эта формула примет вид

$$\rho = \frac{Q}{V}.$$

Размерность и единица пространственной плотности электрического заряда:

$$\dim \rho = L^{-3} TI, \quad [\rho] = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ м}^3 = 1 \text{ Кл} / \text{м}^3.$$

Кулон на кубический метр равен пространственной плотности электрического заряда, при которой в объеме  $1 \text{ м}^3$  равномерно распределен заряд 1 Кл.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы пространственной плотности электрического заряда: Кл/мм<sup>3</sup>, МКл/м<sup>3</sup>, Кл/см<sup>3</sup>, кКл/м<sup>3</sup>, мКл/м<sup>3</sup>, мкКл/м<sup>3</sup>.

● Поверхностная плотность электрического заряда  $\sigma$  — величина, равная отношению заряда  $dQ$ , находящегося на элементе поверхности, к площади  $dS$  этого элемента:

$$\sigma = \frac{dQ}{dS}.$$

Размерность и единица поверхностной плотности заряда:

$$\dim \sigma = L^{-2} TI, \quad [\sigma] = 1 \text{ Кл} / \text{м}^2.$$



Кулон на квадратный метр равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ , равен  $1 \text{ Кл}$ .

Рекомендуемые кратные и дольные единицы поверхностной плотности заряда:  $\text{МКл/м}^2$ ,  $\text{Кл/мм}^2$ ,  $\text{Кл/см}^2$ ,  $\text{кКл/м}^2$ ,  $\text{мКл/м}^2$ ,  $\text{мкКл/м}^2$ .

● Линейная плотность электрического заряда  $\tau$  — величина, равная отношению электрического заряда  $dQ$ , находящегося на элементе линии, к длине  $dl$  этого элемента:

$$\tau = \frac{dQ}{dl}.$$

Размерность и единица линейной плотности заряда:

$$\dim \tau = L^{-1} T I, \quad [\tau] = 1 \text{ Кл/м}.$$

Кулон на метр равен линейной плотности заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по нити длиной  $1 \text{ м}$ , равен  $1 \text{ Кл}$ .

● Удельным зарядом частицы-носителя заряда (электрона, протона и др.) называется величина, равная отношению заряда частицы  $Q$  к массе  $m$ :

$$Q_{\text{уд}} = \frac{Q}{m}.$$

Размерность и единица удельного заряда:

$$\dim Q_{\text{уд}} = M^{-1} T I, \quad [Q_{\text{уд}}] = 1 \text{ Кл/кг}.$$

● Напряженность электрического поля  $E$  — векторная величина, равная отношению силы  $dF$  электрического поля, действующей на точечный пробный электрический заряд<sup>1</sup>  $dQ$ , к этому заряду:

$$E = \frac{dF}{dQ}.$$

Размерность и единица напряженности электрического поля:

<sup>1</sup> Пробным электрическим зарядом называют положительный заряд, используемый для обнаружения и изучения электрического поля. Размер пробного заряда должен быть настолько малым, чтобы он не вызывал перераспределения в пространстве зарядов, создающих исследуемое электрическое поле, и не участвовал в создании этого поля.

$$\dim E = \frac{L M T^{-2}}{T I} = L M T^{-3} I^{-1}, \quad [E] = 1 \text{ Н/Кл}.$$

Ньютон на кулон равен напряженности электрического поля в точке поля, в которой на точечный электрический заряд  $1 \text{ Кл}$  поле действует с силой  $1 \text{ Н}$ .

\* Заметим, что на практике напряженность поля выражается не в ньютонах на кулон, а в вольтах на метр ( $1 \text{ В/м}$ ).

Приведем из нормативных документов два определения вольта на метр.

Вольт на метр равен ньютону на кулон [38].

Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, создаваемого разностью потенциалов  $1 \text{ В}$  между точками, находящимися на расстоянии  $1 \text{ м}$  на линии напряженности поля [53] (см. также с. 119, 120).

Рекомендуемые кратные и дольные единицы напряженности электрического поля:  $\text{МВ/м}$ ,  $\text{кВ/м}$ ,  $\text{В/мм}$ ,  $\text{В/см}$ ,  $\text{мВ/м}$ ,  $\text{мкВ/м}$ .

● Поток напряженности  $d\Phi$  электрического поля через элемент поверхности называют величиной, равную произведению проекции  $E_n$  напряженности поля на вектор нормали  $\mathbf{n}$  к элементу поверхности на площадь  $dS$  этого элемента:

$$d\Phi_E = E_n dS.$$

Поток через поверхность

$$\Phi_E = \int_S E_n dS,$$

где  $S$  — площадь поверхности, через которую определяется поток напряженности.

Если в однородном поле перпендикулярно линиям напряженности расположена плоская поверхность площадью  $S$ , то поток напряженности через нее

$$\Phi_E = ES.$$

Размерность и единица потока напряженности электрического поля:

$$\dim \Phi_E = L^3 M T^{-3} I^{-1}, \quad [\Phi] = 1 \text{ В} \cdot \text{м}$$

Вольт-метр равен потоку напряженности через поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную силовым линиям поля напряженностью  $1 \text{ В} \cdot \text{м}$ .



● Поток электрического смещения  $\Psi$  через замкнутую поверхность в соответствии с теоремой Остроградского — Гаусса есть величина, равная алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (5.1)$$

Эта теорема показывает, что источником потока электрического смещения являются электрические заряды и что поток смещения, создаваемый зарядом, численно равен самому заряду.

Размерность и единица потока электрического смещения:

$$\dim \Psi = \dim Q = TI, \quad [\Psi] = [Q] = 1 \text{ Кл.}$$

*Кулон* равен потоку электрического смещения, связанному с суммарным свободным зарядом 1 Кл.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы потока электрического смещения: МКл, кКл, мКл.

● Электрическое смещение  $\mathbf{D}$  — векторная величина, равная отношению потока электрического смещения  $d\Psi$  через элементарную поверхность к площади  $dS$  этой поверхности:

$$\mathbf{D} = \frac{d\Psi}{dS \cdot \mathbf{k}},$$

где  $\mathbf{k}$  — единичный вектор, сонаправленный с электрическим смещением  $\mathbf{D}$ .

Размерность и единица электрического смещения:

$$\dim D = L^{-2} TI, \quad [D] = \frac{[\Psi]}{[S]} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Кл/м}^2.$$

*Кулон на квадратный метр* равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью 1 м<sup>2</sup> равен 1 Кл.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы электрического смещения: Кл/см<sup>2</sup>, кКл/см<sup>2</sup>, МКл/м<sup>2</sup>, мкКл/м<sup>2</sup>.

\* Приведенные выше определения потока электрического смещения и электрического смещения соответствуют [21], в котором первой из указанных двух величин рассматривается поток электрического смещения.

В [38] приняты иные терминология и последовательность рассмотрения этих двух величин. Сначала рассматривается плотность электрического потока (электрическое смещение), а затем

электрический поток (поток смещения). При этом даны следующие определения указанных величин:

плотность электрического потока (смещение) — векторная величина, дивергенция которой равна плотности заряда;

электрический поток (поток смещения) — поток, пересекающий элемент поверхности и являющийся скалярным произведением площади элемента на плотность электрического потока.

● Электрический момент электрического диполя  $\mathbf{p}$  — векторная величина, равная произведению положительного заряда диполя на его плечо  $\mathbf{l}$ , т. е. на вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между зарядами:

$$\mathbf{p} = |Q| \mathbf{l}.$$

Размерность и единица электрического момента электрического диполя:

$$\dim \mathbf{p} = L TI, \quad [p] = 1 \text{ Кл} \cdot \text{м}.$$

*Кулон-метр* равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого.

Диэлектрик, помещенный в электрическое поле, поляризуется. При этом любой элемент диэлектрика приобретает электрический момент. Количественной характеристикой степени поляризации диэлектрика в данной точке является поляризованность.

● Поляризованность  $\mathbf{P}$  — векторная величина, равная отношению суммы электрических моментов  $\sum_{\Delta V} \mathbf{p}_i$  молекул, заключенных в физически малом элементе диэлектрика, содержащем данную точку, к объему этого элемента:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum \mathbf{p}_i}{\Delta V},$$

где  $\mathbf{p}_i$  — электрический момент  $i$ -й молекулы.

Размерность и единица поляризованности:

$$\dim P = \frac{\dim p}{\dim V} = \frac{L TI}{L^3} = L^{-2} TI,$$

$$[P] = \frac{[p]}{[V]} = \frac{1 \text{ Кл} \cdot \text{м}}{1 \text{ м}^3} = 1 \text{ Кл/м}^2.$$

*Кулон на квадратный метр* равен поляризованности диэлектрика, при котором диэлектрик объемом 1 м<sup>3</sup> имеет электрический момент 1 Кл · м.



Рекомендуемые кратные и дольные единицы поляризованности: Кл/см<sup>2</sup>, кКл/м<sup>2</sup>, МКл/м<sup>2</sup>, мкКл/м<sup>2</sup>.

● Абсолютная диэлектрическая проницаемость<sup>1</sup>  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon$  — величина, характеризующая свойства диэлектрика, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля электрического смещения к модулю напряженности электрического поля:

$$\epsilon_a = \frac{D}{E},$$

— и тензорная для анизотропного вещества.

Размерность и единица абсолютной диэлектрической проницаемости:

$$\dim \epsilon_a = \frac{\dim D}{\dim E} = \frac{L^{-2} T I}{L M T^{-3} I^{-1}} = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2,$$

$$[\epsilon_a] = \frac{[D]}{[E]} = \frac{1 \text{ Кл/м}^2}{1 \text{ В/м}} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = 1 \text{ Ф/м}.$$

Фарад на метр равен абсолютной диэлектрической проницаемости среды, в которой напряженность электрического поля 1 В/м создает электрическое смещение 1 Кл/м<sup>2</sup>.

Рекомендуемые дольные единицы абсолютной диэлектрической проницаемости: мкФ/м, нФ/м, пФ/м.

\* Понятие абсолютной диэлектрической проницаемости используется обычно в электротехнической литературе. В физической учебной и научной литературе, как правило, пользуются сочетанием  $\epsilon \epsilon_0$ , где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

● Электрическая постоянная  $\epsilon_0$  — физическая постоянная, входящая в уравнения электрического поля при записи этих уравнений в рационализованной форме, в соответствии с которой образованы электрические и магнитные единицы в Международной системе единиц.

Значение, единица и размерность электрической постоянной определяются из соотношения

$$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1} = \frac{10^7}{4\pi c^2} \text{ Ф/м} = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная (см. с. 132).

В отличие от абсолютной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_a$ , зависящей от типа вещества, темпе-

ратуры, давления и других параметров, электрическая постоянная  $\epsilon_0$  зависит только от выбора системы единиц. В системе СГС  $\epsilon_0 = 1$ .

Размерность электрической постоянной:

$$\dim \epsilon_0 = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2.$$

Рекомендуемые дольные единицы электрической постоянной: мкФ/м, нФ/м, пФ/м.

\* При современном определении электрической постоянной ( $\epsilon_0 = \mu_0 c^2$ ) понятие точности не лишено смысла, так как магнитная постоянная может быть определена с любым числом знаков, а значение скорости света  $c$  стандартизовано. Поэтому электрическая постоянная может быть выражена с любой точностью (в скобках указывается допустимая погрешность в данных конкретных условиях).

● Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  — величина, равная отношению абсолютной диэлектрической проницаемости к электрической постоянной:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0}.$$

Так как абсолютная диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная имеют одинаковые размерность и единицу, то относительная диэлектрическая проницаемость — величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах.

### Абсолютная диэлектрическая восприимчивость

● Абсолютная диэлектрическая восприимчивость<sup>1</sup>  $\chi_a$ ,  $\chi$  — величина, характеризующая свойства диэлектрика, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля поляризованности  $P$  к модулю напряженности  $E$  электрического поля:

$$\chi = P/E,$$

— и тензорная для анизотропного вещества.

Размерность и единица абсолютной диэлектрической восприимчивости:

$$\dim \chi_a = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2,$$

$$[\chi_a] = \frac{[P]}{[E]} = \frac{1 \text{ Кл/м}^2}{1 \text{ В/м}} = 1 \text{ Кл/(В} \cdot \text{м)} = 1 \text{ Ф/м}.$$

<sup>1</sup> Запасное обозначение  $\chi$  абсолютной диэлектрической восприимчивости обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу [9].

<sup>1</sup> Запасное обозначение  $\epsilon$  абсолютной диэлектрической проницаемости обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу [9].



\* Отметим, что размерность абсолютной диэлектрической восприимчивости совпадает с размерностью абсолютной диэлектрической проницаемости.

• Относительная диэлектрическая восприимчивость  $\chi_r$  — величина, равная отношению абсолютной диэлектрической восприимчивости к электрической постоянной:

$$\chi_r = \frac{\chi_a}{\epsilon_0}.$$

Из этого равенства получим:

$$\dim \chi_r = \frac{\dim \chi_a}{\dim \epsilon_0} = \frac{L^{-3} M^{-1} T^4 I^2}{L^{-3} M^{-1} T^4 I^2} = 1,$$

$$[\chi_r] = \frac{[\chi_a]}{[\epsilon_0]} = \frac{1 \text{ Ф/м}}{1 \text{ Ф/м}} = 1.$$

Следовательно, относительная диэлектрическая восприимчивость — величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах.

• Атомы, ионы и молекулы под действием внешнего электрического поля способны приобретать электрический момент. В слабых полях этот момент пропорционален напряженности электрического поля  $E$  и в СИ выражается формулой

$$p = \alpha \epsilon_0 E,$$

где  $\alpha$  — коэффициент, называемый поляризуемостью атома (иона, молекулы),  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Отсюда получим

$$\alpha = \frac{p}{\epsilon_0 E}.$$

Размерность и единица поляризуемости:

$$\dim \alpha = \frac{TI}{L^{-3} M^{-1} T^4 I^2 M T^{-3} I^{-1}} = L^3,$$

$$[\alpha] = \frac{1 \text{ Кл} \cdot \text{м}}{1 \text{ Ф/м} \cdot 1 \text{ Н/Кл}} = 1 \text{ м}^3.$$

\* В физике твердых и жидких диэлектриков поляризуемостью называют также величину, равную отношению поляризованности диэлектрика к произведению напряженности электрического поля  $E$  и концентрации числа частиц  $n$ , т. е.  $\alpha = P/(En)$ .

• Электрический потенциал  $V$ ,  $\phi$  в некоторой точке поля по своему физическому смыслу есть

величина, равная отношению потенциальной энергии точечного пробного электрического заряда (см. с. 108), помещенного в данную точку поля, к этому заряду:

$$\phi = U/Q.$$

Размерность и единица электрического потенциала:

$$\dim \phi = \frac{\dim U}{\dim Q} = \frac{L^2 M T^{-2}}{T I} = L^2 M T^{-3} I^{-1},$$

$$[\phi] = \frac{[U]}{[Q]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ Дж/Кл}.$$

\* Однако единица потенциала при построении Международной системы единиц получена другим способом и названа *вольт* (см. с. 119).

• Электрическая емкость  $C$  уединенного проводника — величина, равная отношению заряда  $\Delta Q$ , внесенного на проводник, к приращению потенциала  $\Delta \phi$  этого проводника:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta \phi}.$$

Понятие электрической емкости относится также к системе проводников, в частности двух проводников, разделенных тонким слоем диэлектрика, — электрическому конденсатору. Электрическая емкость конденсатора (взаимная емкость его обкладок)

$$C = \frac{Q}{\phi_1 - \phi_2},$$

где  $Q$  — заряд одной из обкладок (заряды обкладок по размеру равны),  $(\phi_1 - \phi_2)$  — разность потенциалов между обкладками.

Размерность и единица электрической емкости:

$$\dim C = L^{-2} M^{-1} T^4 I^2, [C] = 1 \text{ Кл/В}.$$

Эта единица получила наименование фарад (Ф).

Фарад равен емкости конденсатора, напряжение между обкладками которого 1 В при заряде 1 Кл.

Рекомендуемые дольные единицы емкости: мФ, мкФ, нФ, пФ.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК<sup>1</sup>

## Основные понятия

- Полный электрический ток — явление направленного движения носителей зарядов и (или) явление изменения электрического поля во времени, сопровождаемые магнитным полем.
  - Постоянный электрический ток — электрический ток, не изменяющийся с течением времени ни по силе, ни по направлению. Постоянный ток возникает под действием постоянного напряжения и может существовать лишь в замкнутой цепи; во всех сечениях неразветвленной цепи сила постоянного тока одинакова (или слабо изменяется) [72].
  - Периодический электрический ток — электрический ток, мгновенные значения которого повторяются через равные интервалы времени.
  - Переменный электрический ток в широком смысле — электрический ток, изменяющийся во времени. Переменный ток создается переменным напряжением. В технике обычно под переменным током понимают периодический ток, в котором среднее за период значение силы тока и напряжения равны нулю. Периодом  $T$  переменного тока называется наименьший интервал времени, через который значения силы тока и напряжения повторяются [72].
  - Пульсирующий электрический ток — периодический электрический ток, не изменяющий своего направления.
  - Электрический ток проводимости — явление направленного движения свободных носителей заряда в веществе или в вакууме.
  - Электрический ток переноса — электрический ток, осуществляемый переносом электрических зарядов телами.
- \* Для этого тока иногда используется менее удачный термин — синоним «конвекционный ток».
- Электрический ток поляризации — явление движения связанных заряженных частиц в диэлектрике при изменении его поляризованности (см. с. 111).
  - Электрический ток смещения в вакууме — явление изменения электрического поля в вакууме.

<sup>1</sup> Терминология, определения понятий и единиц величин, использованные в данном параграфе, соответствуют [16, 21, 53].

- Электрический ток смещения — совокупность электрического тока смещения в вакууме и электрического тока поляризации.
  - Элементарный электрический ток — электрический ток в замкнутом элементарном контуре, размеры которого весьма малы по сравнению с расстояниями до точек наблюдения.
  - Вихревые токи — электрические токи в проводящем теле, вызванные электромагнитной индукцией, замыкающиеся по контурам, образующим односвязную область.
  - Электропроводность — свойство вещества проводить под действием не изменяющегося во времени электрического поля не изменяющийся во времени электрический ток.
  - Проводник — вещество, основным электрическим свойством которого является электропроводность.
  - Проводник первого рода — проводник с электронной электропроводностью.
  - Проводник второго рода — проводник с ионной электропроводностью.
  - Полупроводник — вещество, основным свойством которого является сильная зависимость удельной проводимости (см. с. 123) от воздействия внешних факторов.
- \* К внешним факторам в данном случае следует отнести температуру, электрическое поле, свет и т. д. (см. также с. 284).
- Сверхпроводимость — явление, заключающееся в том, что электрическое сопротивление некоторых материалов исчезает при температуре ниже некоторого критического значения, зависящего от материала и от магнитной индукции (см. также с. 286).
  - Сверхпроводник — вещество, основным свойством которого является способность при определенных условиях быть в состоянии сверхпроводимости (см. также с. 286).

## Величины, характеризующие электрический ток

- Сила электрического тока (сила тока, ток)<sup>1</sup>  $I$ ,  $i$  — основная электрическая величина Международной системы единиц. По своему физическому смыслу сила тока — скалярная характеристика тока, равная

<sup>1</sup> Буква  $i$  применяется для обозначения мгновенного значения силы тока [9].



отношению количества электричества  $dQ$ , переносимого через сечение проводника за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу [72]:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

\* Здесь еще раз укажем на издержки построения Международной системы единиц в области электромагнитных величин — нелогично определять основную величину системы единиц (в данном случае силу тока) через производную величину (в данном случае электрический заряд). Но иного выхода нет, невозможно определить физический смысл силы тока иначе, как через количество электричества. Аналогичные трудности встретились бы и при выборе в качестве основной величины вместо силы тока иных электрических величин — напряжения, электрического сопротивления, индуктивности и др.

Размерность и единица силы тока, как и других основных величин СИ, выбраны произвольно:

$$\dim I = 1, [I] = 1 \text{ А}.$$

Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н [МКМВ (1946). Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948)].

Для определения единицы силы тока можно было бы воспользоваться любым действием электрического тока — тепловым, химическим, пондеромоторным. Выбрали последнее, так как силовое взаимодействие токов по закону Ампера

$$F = \mu\mu_0 I_1 I_2 / (2\pi r)$$

позволяет установить единицу тока с наибольшей точностью.

Ампер по своему размеру удобен для практических целей, а также имеет простое соотношение с единицей силы тока системы СГСМ ( $1 \text{ А} = 0,1 \text{ СГСМ}_I$ ).

При практическом воспроизведении единицы силы тока — ампера — измеряются силы взаимодействия проводников конечных размеров. Для этого применяются проводники такой формы, для которой можно с достаточной точностью рассчитать силы взаимодействия по закону Ампера.

Эталонная установка для измерения сил взаимодействия проводников называется токовыми весами<sup>1</sup>.

Воспроизведение, хранение и передача ампера производится посредством Государственного первичного эталона ампера СССР.

Относительная погрешность воспроизведения единицы силы тока посредством Государственного первичного эталона ампера не превышает  $1 \cdot 10^{-5}$ .

● Электрическое напряжение (напряжение)  $U$ , и между двумя точками электрической цепи равно работе электрического поля по перемещению единичного положительного заряда из одной точки в другую.

Напряжение  $U$  связано с силой тока  $I$  и мощностью  $P$  постоянного электрического тока соотношением

$$P = IU.$$

Из этого соотношения получим

$$U = P/I. \quad (5.2)$$

Размерность и единица напряжения:

$$\dim U = \frac{\dim P}{\dim I} = \frac{L^2 M T^{-3}}{I} = L^2 M T^{-3} I^{-1},$$

$$[U] = \frac{[P]}{[I]} = \frac{1 \text{ Вт}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ В}.$$

Этой единице присвоено наименование вольт (В).

Вольт равен электрическому напряжению, вызывающему в электрической цепи постоянный электрический ток силой 1 А при мощности 1 Вт.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы электрического напряжения: МВ, кВ, мВ, мкВ, нВ.

\* 1. Вернемся к определению единицы напряженности поля. В потенциальном электрическом поле (электростатическом поле) работа по перемещению электрического заряда не зависит от пути, по которому перемещается заряд. В этом случае электрическое напряжение  $U$  между двумя точками совпадает с разностью потенциалов в этих точках:

$$U = \phi_1 - \phi_2.$$

Из этого равенства следует, что разность потенциалов, а следовательно, и потенциал имеют ту же размерность и выражаются в тех же единицах, что и напряжение:

$$\dim \phi = L^2 M T^{-3} I^{-1}, [\phi] = 1 \text{ В}.$$

<sup>1</sup> О физических основах действия токовых весов см. в [31].



2. Зная единицу потенциала, можем объяснить происхождение единицы напряженности электрического поля—вольт на метр.

В [38] дано следующее определение электрического потенциала: электрический потенциал  $\phi$  для электростатических полей—скалярная величина, градиент которой с противоположным знаком равен напряженности поля:

$$E = -\text{grad } \phi.$$

В случае однородного электрического поля эта формула для модуля напряженности поля примет вид

$$E = \frac{\phi_1 - \phi_2}{d},$$

где  $\phi_1$  и  $\phi_2$ —потенциалы двух точек поля, лежащих на одной силовой линии,  $d$ —расстояние между этими двумя точками.

Из этой формулы получим единицу напряженности электрического поля—вольт на метр (В/м).

● Электродвижущая сила  $E$  источника тока—величина, равная отношению энергии, подаваемой источником, к электрическому заряду, проходящему через источник:

$$E = \frac{W}{Q}.$$

Разделив числитель и знаменатель правой части этой формулы на время  $t$ , получим

$$E = \frac{W/t}{Q/t} = \frac{P}{I}. \quad (5.3)$$

Сравнивая формулы (5.2) и (5.3), заключаем, что электродвижущая сила источника имеет те же размерность и единицу, что и напряжение:

$$\dim E = L^2 M T^{-3} I^{-1}, [E] = \frac{1 \text{ Вт}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Вт/А} = 1 \text{ В}.$$

Рекомендуемые кратные и дольные единицы электродвижущей силы: МВ, кВ, мВ, мкВ, нВ.

\* Нельзя признать удачным обозначение электродвижущей силы буквой  $E$ , рекомендованное [38] и [21]. Оно совпадает с обозначением  $E$  напряженности электрического поля. Между тем эти две величины в ряде случаев входят в одну и ту же формулу, например в формулу  $E = \int E^* dl$ , где  $E^*$ —напряженность поля сторонних сил,  $E$ —электродвижущая сила.

Следует отметить, что в учебной литературе по физике э.д.с. обозначается буквой  $\mathcal{E}$ . Такое обозначение используется также в [72].

● Плотность электрического тока  $J$ —векторная величина, равная пределу отношения силы тока сквозь некоторый элемент поверхности, нормальный к направлению движения носителей заряда, к площади этого элемента поверхности, когда этот элемент поверхности стремится к нулю. Модуль плотности тока

$$J = \frac{dI}{dS}.$$

Размерность и единица плотности тока:

$$\dim J = L^{-2} I, [J] = \frac{1 \text{ А}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ А/м}^2.$$

Ампер на квадратный метр равен плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по поперечному сечению проводника площадью  $1 \text{ м}^2$ , равна  $1 \text{ А}$ .

Рекомендуемые кратные и дольные единицы плотности электрического тока: МА/м<sup>2</sup>, А/мм<sup>2</sup>, А/см<sup>2</sup>, кА/м<sup>2</sup>.

\* Плотность электрического тока имеет направление, совпадающее с направлением движения положительно заряженных частиц или соответственно противоположное направлению движения отрицательно заряженных частиц.

● Линейная плотность тока  $A$ —векторная величина, равная пределу произведения плотности тока, протекающего в тонком слое у поверхности тела, к толщине этого слоя, когда последний стремится к нулю:

$$dA = J dh.$$

Размерность и единица линейной плотности тока:

$$\dim A = L^{-1} I, [A] = 1 \text{ А/м}.$$

Ампер на метр равен линейной плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по сечению тонкого листового проводника шириной  $1 \text{ м}$ , равна  $1 \text{ А}$ .

Рекомендуемые кратные и дольные единицы линейной плотности тока: кА/м, А/мм, А/см.

\* В [38] дано следующее определение линейной плотности тока. Линейная плотность тока—отношение тока к ширине проводящего слоя.

● Электрическое активное сопротивление (сопротивление)  $R$ —величина, характеризующая однородный



и равная отношению напряжения  $U$  на концах участка к силе тока  $I$  в нем:

$$R = U/I. \quad (5.4)$$

Активное сопротивление проводника зависит от его размеров и формы.

Размерность и единица активного сопротивления:

$$\dim R = \frac{L^2 M T^{-3} I^{-1}}{I} = L^2 M T^{-3} I^{-2},$$

$$[R] = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ В/А}.$$

Эта единица называется ом (Ом).

Ом равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение 1 В при силе постоянного тока 1 А.

● Активная электрическая проводимость (проводимость. Нрк. электропроводность) участка цепи  $G$  — величина, обратная активному сопротивлению этого участка, т. е. величина, равная отношению силы тока  $I$  в участке к напряжению  $U$  на концах участка:

$$G = 1/R = I/U.$$

Размерность и единица проводимости:

$$\dim G = \frac{1}{R} = \frac{1}{L^2 M T^{-3} I^{-2}} = L^{-2} M^{-1} T^3 I^2,$$

$$[G] = \frac{1}{[R]} = \frac{1}{1 \text{ В/А}} = \frac{1 \text{ А}}{1 \text{ В}} = 1 \text{ Ом}^{-1}.$$

Эта единица называется сименс (См).

Сименс равен электрической проводимости проводника сопротивлением 1 Ом.

● Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  — величина, равная отношению модуля напряженности электрического поля к модулю плотности тока, скалярная для изотропного вещества и тензорная для анизотропного вещества:

$$\rho = E/J.$$

Размерность и единица удельного сопротивления:

$$\dim \rho = \frac{\dim E}{\dim J} = \frac{L M T^{-3} I^{-1}}{L^{-2} I} = L^3 M T^{-3} I^{-2},$$

$$[\rho] = \frac{[E]}{[J]} = \frac{1 \text{ В/м}}{1 \text{ А/м}^2} = 1 \text{ В} \cdot \text{м/А} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Ом-метр равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$  и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы удельного электрического сопротивления: ГОм·м, МОм·м, кОм·м, Ом·см, мОм·м, мкОм·м, нОм·м.

● Удельная электрическая проводимость  $\gamma$  — величина, характеризующая электропроводность вещества, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля плотности тока проводимости к модулю напряженности электрического поля:

$$\gamma = \frac{J}{E},$$

— и тензорная для изотропного вещества.

Размерность и единица удельной электрической проводимости:

$$\dim \gamma = \frac{L^{-2} I}{L M T^{-3} I^{-1}} = L^{-3} M^{-1} T^3 I^2,$$

$$[\gamma] = \frac{1 \text{ А/м}^2}{1 \text{ В/м}} = 1 \text{ См/м}.$$

Сименс на метр равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$  и длине 1 м имеет электрическую проводимость 1 См.

Рекомендуемые кратные единицы удельной электрической проводимости: МСм/м, кСм/м.

● Плотность электрического тока смещения  $J_{\text{см}}$  — векторная величина, равная производной электрического смещения по времени:

$$J_{\text{см}} = \frac{dD}{dt}.$$

Размерность и единица плотности электрического тока смещения:

$$\dim J_{\text{см}} = \frac{\dim D}{\dim t} = \frac{L^{-2} T I}{T} = L^{-2} I,$$

$$[J_{\text{см}}] = \frac{1 \text{ Кл/м}^2}{1 \text{ с}} = 1 \text{ А/м}^2.$$

Следовательно, плотность электрического тока смещения имеет ту же размерность, что и плотность



электрического тока проводимости, и выражается в амперах на квадратный метр.

• Температурный коэффициент электрического сопротивления  $\alpha$  — величина, равная отношению относительного изменения сопротивления участка электрической цепи к изменению его температуры, вызвавшему это изменение сопротивления.

Для металлов и сплавов зависимость удельного сопротивления от температуры в небольшом интервале температур вблизи  $0^\circ\text{C}$  выражается формулой

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$ .

Отсюда получим

$$\alpha = (\rho - \rho_0) / (\rho_0 t).$$

Положив в этой формуле  $t = 1^\circ\text{C}$ , найдем

$$[\alpha] = \frac{[\rho - \rho_0]}{[\rho_0] 1^\circ\text{C}} = 1^\circ\text{C}^{-1} = 1\text{ K}^{-1}.$$

Размерность температурного коэффициента электрического сопротивления —

$$\dim \alpha = \Theta^{-1}.$$

• Постоянная термопары  $\alpha$  — физическая величина, равная отношению термоэлектродвижущей силы  $E$ , возникающей в цепи термопары, к разности температур  $\Delta T$  между спаями:

$$\alpha = \frac{E}{\Delta T}.$$

Размерность и единица постоянной термопары:

$$\dim \alpha = \frac{\dim E}{\dim T} = \frac{\text{L}^2 \text{MT}^{-3} \text{I}^{-1}}{\Theta} = \text{L}^2 \text{MT}^{-3} \Theta^{-1} \text{I}^{-1},$$

$$[\alpha] = 1 \text{ В/1 К} = 1 \text{ В/К}.$$

Вольт на кельвин равен постоянной термопары, термоэлектродвижущая сила которой равна 1 В при разности температур спаев 1 К.

• Коэффициент Пельтье  $\Pi$  — физическая величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности в формуле, выражающей зависимость между

количеством теплоты  $Q$ , выделившимся в спаях двух металлов, и электрическим зарядом  $q$ , прошедшим через спай при пропускании по цепи электрического тока:

$$Q = \Pi q.$$

Размерность и единица коэффициента Пельтье:

$$\dim \Pi = \text{L}^2 \text{MT}^{-3} \text{I}^{-1}, \quad \Pi = \frac{[Q]}{[q]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ Дж/Кл}.$$

• Эмиссионная постоянная  $B$  — физическая величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности в формуле Ричардсона — Дешмена, выражающей плотность анодного тока насыщения  $\delta_{\text{нас}}$ :

$$\delta_{\text{нас}} = B T^2 e^{-A/(kT)},$$

где  $T$  — термодинамическая температура катода,  $A$  — работа выхода электрода из металла катода,  $k$  — постоянная Больцмана.

Из этой формулы получим

$$B = \delta_{\text{нас}} e^{A/(kT)} / T^2.$$

Так как  $e^{A/(kT)}$  — величина безразмерная, то

$$\dim B = \frac{\dim \delta_{\text{нас}}}{T^2} = \frac{\text{L}^{-2} \text{I}}{\Theta^2} = \text{L}^{-2} \Theta^{-2} \text{I},$$

$$[B] = \frac{1 \text{ А/м}^2}{1 \text{ К}^2} = 1 \text{ А/м}^2 \cdot \text{К}^2.$$

## § 5.3

### МАГНЕТИЗМ

#### Основные понятия<sup>1</sup>

• Электромагнитное поле — вид материи, определяющийся во всех точках двумя векторными величинами, которые характеризуют две его стороны, называемые соответственно «электрическое поле» и «магнитное поле», и оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы, зависящее от их скорости и размера их заряда.

<sup>1</sup> Терминология и определения основных понятий соответствуют [20, 21].



- Магнитное поле — одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на движущуюся электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости.
- Стационарное магнитное поле — магнитное поле не изменяющихся во времени электрических токов при условии неподвижности проводников с током.
- Магнитостатическое поле — магнитное поле неподвижных намагниченных тел.
- Магнитный диполь — любой элементарный объем, создающий на больших по сравнению с его размерами расстояниях магнитное поле, идентичное магнитному полю элементарного электрического тока.
- Магнетик — вещество, основным свойством которого является способность намагничиваться.
- Диамагнетик — вещество, атомы, ионы или молекулы которого не имеют результирующего магнитного момента при отсутствии внешнего магнитного поля. Во внешнем постоянном магнитном поле магнитная восприимчивость такого вещества отрицательна.
- Парамагнетик — вещество, атомы, ионы или молекулы которого имеют результирующий магнитный момент при отсутствии внешнего магнитного поля. Во внешнем постоянном магнитном поле магнитная восприимчивость такого вещества положительна, но много меньше единицы.
- Ферромагнетик — кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.
- Антиферромагнетик — кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю.
- Домен — область в магнитном материале или в антиферромагнетике, имеющая пространственно однородное упорядочение магнитных моментов атомов или ионов.
- Доменная граница — переходная область между соседними доменами, в которой магнитные моменты атомов или ионов меняют свое пространственное

- упорядочение от упорядочения, соответствующего одному домену, до упорядочения соседнего.
- Магнитная анизотропия — неодинаковость магнитных свойств в магнитном материале в различных направлениях.
- Точка Кюри — критическая температура, выше которой ферромагнетик (ферримagnetик) утрачивает ферромагнитные свойства.
- Точка Нееля — критическая температура, выше которой антиферромагнетик становится парамагнетиком.
- Намагничивание — процесс, в результате которого под воздействием внешнего магнитного поля возрастает намагниченность (см. с. 131) магнитного материала.
- Магнитный гистерезис — неоднозначная зависимость намагниченности магнитного материала от напряженности внешнего магнитного поля при его квазистатическом изменении.
- Петля магнитного гистерезиса (иногда цикл магнитного гистерезиса) — замкнутая кривая, выражающая зависимость намагниченности материала от амплитуды напряженности магнитного поля при периодическом достаточно медленном изменении последнего.
- Коэрцитивная сила — величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения намагниченности от остаточной намагниченности до нуля.
- Продольная магнитострикция — относительное изменение линейного размера образца из магнитного материала в направлении намагниченности.
- Поперечная магнитострикция — относительное изменение линейного размера образца из магнитного материала в направлении, перпендикулярном направлению намагниченности.
- Объемная магнитострикция — относительное изменение объема образца из магнитного материала при его намагничивании.
- Электромагнитная индукция — явление возбуждения электродвижущей силы в контуре при изменении магнитного потока, сцепленного с ним.
- Самоиндукция — электромагнитная индукция, вызванная изменением сцепляющегося с контуром магнитного потока, обусловленного электрическим током в этом контуре.



• Взаимная индукция — электромагнитная индукция, вызванная изменением сцепляющегося с контуром магнитного потока, обусловленного электрическими токами в других контурах.

• Сила Лоренца — векторная величина, представляющая собой силу, действующую на заряженную частицу, движущуюся в электромагнитном поле.

Сила Лоренца имеет две составляющие: электрическую, не зависящую от скорости частицы, обусловленную электрическим полем, и магнитную, пропорциональную скорости частицы, действующую со стороны магнитного поля.

### Магнитные величины<sup>1</sup>

• Магнитная индукция  $B$  — векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.

Магнитная индукция численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу, к произведению заряда и скорости частицы, если направление скорости таково, что эта сила максимальна и имеет направление, перпендикулярное векторам силы и скорости и совпадающее с поступательным перемещением правого винта при вращении его от направления силы к направлению скорости частицы с положительным зарядом.

Следуя этому определению магнитной индукции, размерность и единицу ее найдем, пользуясь формулой силы Лоренца:

$$F = Q[v \cdot B], \quad (5.5)$$

где  $Q$  — заряд частицы, движущейся в магнитном поле,  $v$  — ее скорость,  $F$  — сила, действующая на частицу.

Выразим из (5.5) модуль магнитной индукции:

$$B = \frac{F}{Qv \sin \alpha}.$$

Размерность и единица магнитной индукции:

<sup>1</sup> Терминология, определения, обозначения и единицы магнитных величин соответствуют [9, 16, 21, 53].

$$\dim B = \frac{\dim F}{\dim Q \dim v} = \frac{LMT^{-2}}{TI \cdot LT^{-1}} = MT^{-2}I^{-1};$$

$$[B] = \frac{[F]}{[Q][v]} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ м/с}} = 1 \frac{\text{Н/Кл}}{\text{м/с}} = 1 \text{ Тл.}$$

Эта единица называется тесла.

Тесла равна магнитной индукции однородного магнитного поля, в котором на заряженную частицу с зарядом 1 Кл, движущуюся перпендикулярно линиям индукции со скоростью 1 м/с, действует сила 1 Н.

Рекомендуемые дольные единицы магнитной индукции: мТл, мкТл, нТл.

• Магнитный поток  $\Phi$  — поток магнитной индукции.

Магнитный поток, проходящий через элемент поверхности, является скалярным произведением площади элемента поверхности на магнитную индукцию [38]:

$$d\Phi = B dS \cos \alpha.$$

Размерность и единица магнитного потока:

$$\dim \Phi = \dim B \dim S = MT^{-2}I^{-1}L^2 = L^2MT^{-2}I^{-1};$$

$$[\Phi] = [B][S] = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

Эта единица получила наименование вебер.

Вебер равен магнитному потоку, проходящему через элемент плоской поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>, установленной нормально к линиям индукции однородного магнитного поля, магнитная индукция которого равна 1 Тл.

Рекомендуемая дольная единица магнитного потока — мВб.

\* В [53] даны следующие определения единиц магнитного потока — вебера — и магнитной индукции — тесла.

Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл.

Тесла равна магнитной индукции, при которой через поперечное сечение площадью 1 м<sup>2</sup> проходит магнитный поток 1 Вб.

Такие определения вебера и тесла соответствуют построению системы магнитных величин, при котором из двух магнитных величин — магнитной индукции и магнитного потока — первой вводится магнитный поток. При этом магнитная индукция определяется через магнитный поток.



В этом пособии использована последовательность величин, принятая в [20] и [38].

● Потокосцепление  $\Psi$  — сумма магнитных потоков, сцепленных с проводниками элемента электрической цепи,

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i,$$

где  $\Phi_i$  — магнитный поток через  $i$ -й проводник,  $N$  — число проводников.

Если все проводники одинаковы, как, например, витки соленоида или тороида, и плотно прилегают друг к другу, то

$$\Psi = \Phi N, \quad (5.6)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток через один виток (магнитный поток через поперечное сечение соленоида или тороида),  $N$  — число витков.

Из формулы (5.6) следует, что потокосцепление имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и магнитный поток, т. е.

$$\dim \Psi = L^2 M T^{-2} I^{-1}, \quad [\Psi] = 1 \text{ Вб}.$$

\* 1. Потокосцепление самоиндукции — потокосцепление элемента электрической цепи, обусловленное электрическим током в этом элементе.

2. Потокосцепление взаимной индукции — потокосцепление одного элемента электрической цепи, обусловленное электрическим током в другом элементе цепи.

● Магнитный момент  $\mathbf{m}$  плоского контура с током — векторная величина, численно равная произведению силы тока  $I$  на площадь  $S$ , ограниченную контуром тока, и направленная по положительной нормали к контуру:

$$\mathbf{m} = I \mathbf{S} \mathbf{n},$$

где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор, сонаправленный с нормалью.

Согласно классической теории электромагнитных явлений, источником магнетизма являются макро- и микро-(атомные) электрические токи. В этом смысле магнитный момент  $\mathbf{m}$  является основной величиной, характеризующей магнитные свойства вещества.

Размерность и единица магнитного момента:

$$\dim m = L^2 I, \quad [m] = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Ампер-квадратный метр равен магнитному моменту электрического тока силой 1 А, проходящего по контуру площадью 1 м<sup>2</sup>.

\* Кроме амперовского магнитного момента рассматривается магнитный момент (кулоновский), т. е. магнитный момент магнитного диполя.

Размерность и единица кулоновского магнитного момента:

$$\dim m = L^3 M T^{-2} I^{-1}, \quad [m] = 1 \text{ Вб} \cdot \text{м}.$$

● Намагниченность  $\mathbf{M}$  — векторная величина, характеризующая магнитное состояние вещества, равная пределу отношения магнитного момента элемента объема вещества к этому элементу объема, когда последний стремится к нулю:

$$\mathbf{M} = d\mathbf{m}/dV.$$

Размерность и единица намагниченности:

$$\dim M = \frac{L^2 I}{L^3} = L^{-1} I; \quad [M] = 1 \text{ А/м}.$$

Ампер на метр равен намагниченности, при которой вещество объемом 1 м<sup>3</sup> имеет магнитный момент 1 А·м<sup>2</sup>.

Рекомендуемые кратные единицы намагниченности: кА/м, А/мм.

● Магнитная восприимчивость  $\chi$ ,  $\chi$  — величина, характеризующая свойство вещества намагничиваться в магнитном поле, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля намагниченности к модулю напряженности магнитного поля:

$$\chi = M/H,$$

— и тензорная для анизотропного вещества.

Размерность и единица магнитной восприимчивости:

$$\dim \chi = \frac{\dim M}{\dim H} = \frac{L^{-1} I}{L^{-1} I} = 1.$$

Магнитная восприимчивость — величина безразмерная и, следовательно, выражается в относительных единицах.

● Индуктивность  $L$  — скалярная величина, равная отношению потокосцепления самоиндукции  $\Psi$  элемента электрической цепи к силе тока  $I$  в нем:



$$L = \Psi / I.$$

Размерность и единица индуктивности:

$$\dim L = \frac{\dim \Psi}{\dim I} = \frac{L^2 M T^{-2} I^{-1}}{I} = L^2 M T^{-2} I^{-2},$$

$$[L] = \frac{[\Psi]}{[I]} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Вб/А}.$$

Эта единица получила наименование генри (Гн).

Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.

Рекомендуемые дольные единицы индуктивности: мГн, мкГн, нГн, пГн.

• Взаимная индуктивность  $M$ ,  $L_{m,n}$  — скалярная величина, равная отношению потокоцепления взаимной индукции одного элемента электрической цепи к силе тока в другом элементе, обуславливающего это потокоцепление.

Взаимная индуктивность имеет ту же размерность, что и индуктивность:

$$\dim M = L^2 M T^{-2} I^{-2}, \quad [L] = 1 \text{ Гн}.$$

Рекомендуемые дольные единицы взаимной индуктивности: мГн, мкГн, нГн, пГн.

• Магнитная постоянная  $\mu_0$  — постоянная, равная в Международной системе единиц  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,566\,370\,614 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  (точно).

Размерность магнитной постоянной  $L M T^{-2} I^{-2}$ .

Рекомендуемые дольные единицы магнитной постоянной: мкГн/м, нГн/м.

• Напряженность  $H$  магнитного поля — векторная величина, определяемая равенством

$$H = B / \mu_0 - M, \quad (5.7)$$

где  $B$  — магнитная индукция,  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $M$  — намагниченность среды.

Физический смысл напряженности магнитного поля ясен из теоремы о циркуляции вектора напряженности: циркуляция вектора напряженности магнитного поля по некоторому контуру равна алгебраической сумме макроскопических токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint H dl = \sum_1^k I_k,$$

где  $k$  — номер тока, охватываемого контуром.

Напряженность магнитного поля является аналогом электрического смещения  $D$ .

Формула (5.7) для напряженности поля в вакууме принимает вид

$$H = B / \mu_0,$$

так как в вакууме намагниченность  $M = 0$ .

Размерность и единица напряженности магнитного поля:

$$\dim H = L^{-1} I, \quad [H] = [M] = 1 \text{ А/м}.$$

Для определения единицы напряженности магнитного поля — ампера на метр — воспользуемся формулой напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида:

$$H = (N/l) I = nI,$$

где  $N$  — число витков соленоида,  $l$  — его длина,  $I$  — сила тока в нем,  $n$  — число витков на участке соленоида длиной 1 м.

Положив в этой формуле  $I = 1/\{n\}$ , получим единицу напряженности магнитного поля:

$$H = n \cdot 1/\{n\} = 1 \text{ А/м}.$$

Ампер на метр равен напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида с равномерно распределенной обмоткой, по которой проходит ток  $1/\{n\}$ , где  $n$  — число витков на участке соленоида длиной 1 м.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы напряженности магнитного поля: кА/м, А/мм, А/см.

• Абсолютная магнитная проницаемость<sup>1</sup>  $\mu_a$ ,  $\mu$  — величина, характеризующая магнитные свойства вещества, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля магнитной индукции к модулю напряженности магнитного поля:

$$\mu_a = B / H,$$

— тензорная для анизотропного вещества.

<sup>1</sup> Запасное обозначение  $\mu$  абсолютной магнитной проницаемости обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу [9].



Размерность и единица абсолютной магнитной проницаемости:

$$\dim \mu_a = \frac{\dim B}{\dim H} = \frac{MT^{-2}I^{-1}}{L^{-1}I} = LMT^{-2}I^{-2},$$

$$[\mu_a] = \frac{1 \text{ Тл}}{1 \text{ А/м}} = 1 \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} = 1 \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Гн/м}.$$

Генри на метр равен абсолютной магнитной проницаемости среды, в которой напряженность магнитного поля 1 А/м создает магнитную индукцию 1 Тл.

Рекомендуемые дольные единицы абсолютной магнитной проницаемости: мкГн/м, нГн/м.

• Относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$  — величина, равная отношению абсолютной магнитной проницаемости к магнитной постоянной:

$$\mu_r = \mu_a / \mu_0. \quad (5.8)$$

Так как абсолютная магнитная проницаемость и магнитная постоянная имеют одинаковую размерность, то из (5.8) следует, что относительная магнитная проницаемость — величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах.

• Магнитодвижущая сила  $F$  вдоль замкнутого контура — скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности магнитного поля вдоль рассматриваемого замкнутого контура и равная полному току, охватываемому этим контуром:

$$F = \oint H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i,$$

где  $H_l$  — проекция вектора напряженности на направление перемещения  $dl$  — число токов, охватываемых контуром.

Если замкнутый контур берется вдоль оси тороида, по которому течет постоянный ток  $I$ , то магнитодвижущая сила

$$F = IN,$$

где  $N$  — число витков тороида.

Размерность и единица магнитодвижущей силы:

$$\dim F = I, \quad [F] = 1 \text{ А}.$$

Ампер равен магнитодвижущей силе вдоль замкнутого контура, сцепленного с контуром, в котором течет постоянный ток 1 А.

Рекомендуемые кратная и дольная единицы магнитодвижущей силы: кА, мА.

• Разность скалярных магнитных потенциалов  $U_m$  — скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности магнитного поля между двумя точками вдоль выбранного участка пути, проходящего в односвязной области, где плотность электрического тока равна нулю:

$$U_m = \int H_l dl.$$

Размерность и единица разности скалярных магнитных потенциалов:

$$\dim U_m = \dim H \dim l = L^{-1}IL = I,$$

$$[U_m] = [H][l] = 1 \text{ А/м} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ А}.$$

Рекомендуемые кратная и дольная единицы разности магнитных потенциалов: кА, мА.

• Скалярный магнитный потенциал  $V_m$ ,  $\phi_m$  — разность скалярных магнитных потенциалов данной точки и другой, определенной, но произвольно выбранной.

• Векторный магнитный потенциал  $A$  — векторная величина, ротор которой равен магнитной индукции:

$$\text{rot } A = B.$$

Рекомендуемая кратная единица векторного магнитного потенциала — кТл·м.

• Магнитное сопротивление  $R_m$ ,  $r_m$  — скалярная величина, равная отношению разности магнитных потенциалов на рассматриваемом участке магнитной цепи к магнитному потоку на этом участке:

$$R_m = U_m / \Phi.$$

Размерность и единица магнитного сопротивления:

$$\dim R_m = \frac{\dim U_m}{\dim \Phi} = \frac{I}{L^2MT^{-2}I^{-1}} = L^{-2}M^{-1}T^2I^2,$$

$$[R_m] = \frac{[U_m]}{\Phi} = \frac{1 \text{ А}}{1 \text{ Вб}} = 1 \text{ А/Вб} = 1 \text{ Гн}^{-1}.$$

Генри в минус первой степени равен магнитному сопротивлению магнитной цепи, в которой намагничивающая сила (разность магнитных потенциалов) 1 А создает магнитный поток 1 Вб.



- Магнитная проводимость  $A$  — скалярная величина, равная отношению магнитного потока в рассматриваемом участке магнитной цепи к разности магнитных потенциалов в этом участке:

$$A = \Phi / U_m.$$

Размерность и единица магнитной проводимости:

$$\dim A = L^2 M T^{-2} I^{-2}, \quad [A] = 1 \text{ Вб} / A = 1 \text{ Гн}.$$

Генри равен магнитной проводимости магнитной цепи с магнитным сопротивлением  $1 \text{ Гн}^{-1}$ .

#### § 5.4

#### РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Как было указано выше, в Международной системе единиц применяются уравнения электромагнетизма в рационализованной форме.

Сущность рационализации состоит в следующем.

Во многие формулы электромагнетизма, записанные в нерационализованной форме, входят множители  $4\pi$  и  $2\pi$ . О. Хевисайдом было замечено, что если в знаменатели формул закона Кулона и закона Био — Савара — Лапласа

$$F = Q_1 Q_2 / (\epsilon_0 \epsilon r^2),$$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I d \sin \alpha}{r^2}$$

ввести множитель  $4\pi$ , т. е. записать эти законы в виде

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}, \quad dB = \frac{\mu_0 \mu I d \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

и в соответствии с этим изменить другие формулы электромагнетизма, то множители  $4\pi$  и  $2\pi$  исчезнут из тех формул, которые наиболее часто встречаются на практике. В первую очередь это относится к уравнениям Максвелла.

Такое преобразование уравнений, произведенное с целью упрощения наиболее употребительных формул, получило название «рационализация уравнений электромагнитного поля». Уравнения электромагнитного поля в рационализованной и нерационализованной формах приведены в табл. 9.

## Глава 6

## КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### § 6.1

#### КОЛЕБАНИЯ<sup>1</sup>

- Колебания — движения или процессы, обладающие той или иной степенью повторяемости во времени. Колебания свойственны всем явлениям природы: пульсируют излучения звезд, внутри которых происходят циклические ядерные реакции; с высокой степенью периодичности вращаются планеты Солнечной системы; движение Луны периодически вызывает приливы и отливы на Земле; внутри любого живого организма непрерывно происходят разнообразные ритмично повторяющиеся процессы.

Колебания любых физических величин почти всегда связаны с попеременным превращением энергии одного вида в энергию другого вида. Так, при колебаниях физического маятника, когда он движется к положению равновесия, потенциальная энергия превращается в кинетическую, а когда он движется от положения равновесия, его кинетическая энергия превращается в потенциальную. При электрических колебаниях в электрическом колебательном контуре попеременно происходит превращение энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки самоиндукции и обратно.

#### Общие понятия

- Колеблющаяся величина — поочередно возрастающая и убывающая во времени физическая (скалярная, векторная или тензорная) величина, связанная с описанием и движением системы.
- Колебательная система — система, способная совершать свободные колебания (см. с. 139).

<sup>1</sup> Терминология и определения физических величин, а также других понятий в данном параграфе соответствуют [25, 62, 72].



- Вынуждающая сила (нрк. возмущающая сила) — переменная во времени и не зависящая от состояния системы сила, вызывающая колебания этой системы.
- Восстанавливающая сила — сила, зависящая от отклонения системы из положения равновесия и направленная противоположно этому отклонению.
- Силовое возбуждение колебаний (силовое возбуждение) — возбуждение колебательной системы вынуждающей силой.
- \* В случае механических колебаний вынуждающей силой является периодическая механическая сила, в случае электромагнитных колебаний — переменная электродвижущая сила.
- Кинематическое возбуждение колебаний — возбуждение колебаний механической системы сообщением каким-либо ее точкам заданных движений.
- Параметрическое возбуждение колебаний — возбуждение колебаний периодическим воздействием на те параметры системы, которые определяют размер запасенной колебательной энергии: в электрическом колебательном контуре — это индуктивность или емкость, у маятника — это длина нити или масса груза.
- Гармоническое возбуждение колебаний (гармоническое возбуждение) — силовое или кинематическое возбуждение колебаний по гармоническому закону.
- \* При гармоническом законе вынуждающая сила или заданное перемещение точки механической системы прямо пропорционально синусу с аргументом, линейно зависящим от времени.
- Самовозбуждение колебаний — возбуждение колебаний системы поступлением в нее энергии от неколебательного источника, которое регулируется самой системой.
- Автономная колебательная система (автономная система) — колебательная система, у которой источник энергии или отсутствует, или является ее частью.
- Автоколебательная система — автономная колебательная система, способная совершать периодические колебания, возбуждаемые поступлением энергии от неколебательного источника, которое регулируется движением самой системы.
- Линейная колебательная система (линейная система) — колебательная система, колебания которой описываются линейными дифференциальными уравнениями и граничными условиями.
- Парциальная колебательная система (парциальная система) — каждая из колебательных систем, получа-

емая из данной системы с конечным числом степеней свободы, если все обобщенные координаты, кроме одной, считать постоянными.

- Свободные колебания — колебания, совершающиеся при отсутствии внешнего воздействия за счет первоначально внесенной энергии, например в механической колебательной системе — за счет потенциальной энергии, внесенной через начальное смещение, или кинетической энергии, внесенной через начальную скорость.

В реальных системах вследствие рассеяния энергии свободные колебания всегда затухающие (см. с. 141).

- Вынужденные колебания — колебания, вызванные вынуждающей силой, а в случаях механических колебаний вызванные также кинематическим возбуждением.
- Параметрические колебания — колебания, вызванные параметрическим возбуждением.
- Периодические колебания — колебания, при которых состояние системы повторяется через равные интервалы времени.
- Почти периодические колебания — колебания, близкие к периодическим, состоящим из гармоник (см. с. 142) с несоизмеримыми периодами.
- Установившиеся колебания — периодические или почти периодические колебания, которые устанавливаются в системе по прошествии некоторого времени после начала колебаний.
- Случайные колебания — колебания, представляющие собой случайный процесс.
- Гармонические колебания — колебания, при которых физическая (или любая другая) величина изменяется с течением времени по синусоидальному закону:  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $x$  — значение колеблющейся величины в данный момент времени (для механических гармонических колебаний, например, смещение или скорость, для электрических гармонических — напряжение или сила тока),  $A$  — амплитуда колебаний,  $\omega$  — угловая частота колебаний,  $(\omega t + \varphi)$  — фаза колебаний,  $\varphi$  — начальная фаза колебаний (см. с. 142). Гармонические колебания занимают среди всех колебаний особое место, так как гармонические колебания — единственный вид колебаний, форма которых не искажается при прохождении через любую линейную систему. Кроме того, любое



негармоническое колебание можно представить в виде суммы различных гармонических колебаний, т. е. в виде спектра гармонических колебаний.

\* Линейные системы — системы, движения в которых удовлетворяют принципу суперпозиции и описываются линейными уравнениями. К линейным системам относятся все виды сплошных сред (газ, жидкость, твердое тело, плазма) при распространении в них возмущений малой амплитуды, когда параметры, характеризующие эти среды (плотность, упругость, проводимость, диэлектрическую и магнитную проницаемость и т. д.), можно считать постоянными, не зависящими от амплитуды волн.

• Синхронные колебания — периодические колебания двух (или более) колебательных систем с одинаковыми частотами.

\* Здесь и далее имеются в виду как «частота» периодических колебаний, так и «угловая частота» периодических колебаний.

• Синфазные гармонические колебания (синфазные колебания) — синхронные гармонические колебания с равными в любой момент времени «фазами» (см. с. 143).

• Антифазные гармонические колебания (антифазные колебания) — синхронные гармонические колебания, у которых разность фаз в любой момент времени равна  $\pi$ .

• Почти гармонические колебания — колебания, при которых значения колеблющейся величины изменяются во времени по закону

$$A \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $t$  — время;  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  — медленно изменяющиеся функции времени (в частности, некоторые из них могут быть постоянными).

• Биения — периодические изменения амплитуды результирующего колебания, возникающие при сложении двух гармонических колебаний с близкими частотами. Биения возникают вследствие того, что происходит постепенное накапливание разности фаз, которая растет, достигая последовательно через равные интервалы времени значений  $\pi$ ,  $2\pi$ ,  $3\pi$  и т. д. При этом колебания оказываются то в фазе, то в противофазе. В первом случае амплитуда результирующего колебания достигает значения, равного сумме амплитуд слагаемых колебаний  $A_1 + A_2$  (при равенстве амплитуд — удвоенной амплитуде  $2A$ ), во втором случае — значения, равного разности амплитуд  $A_1 - A_2$  (при равенстве амплитуд — нулю) (рис. 6.1).

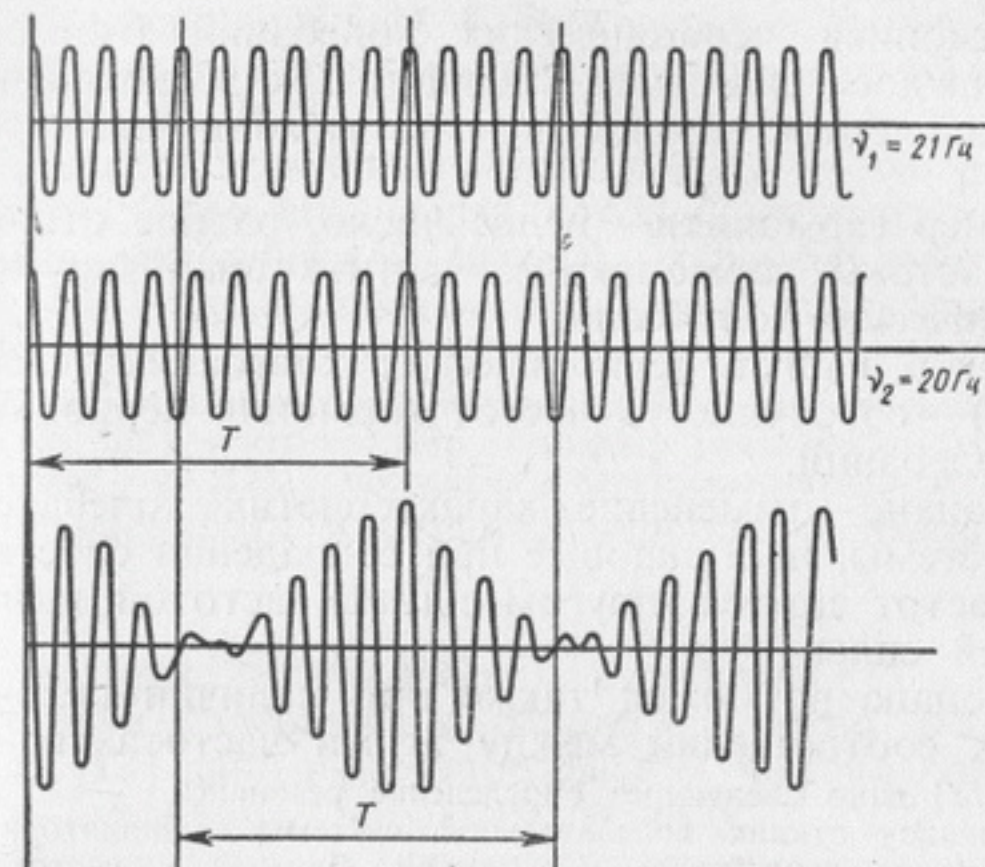


Рис. 6.1. Биения, возникающие при сложении двух колебаний с близкими частотами ( $\nu_1 = 21$  Гц и  $\nu_2 = 20$  Гц)

• Комбинационные колебания — гармоники периодических вынужденных колебаний, частоты которых в дробное число раз отличаются от частоты гармонического возбуждения.

• Затухающие колебания — колебания с уменьшающимися во времени значениями размаха колеблющейся величины или ее производной по времени, обусловленные потерей энергии колебательной системой. Простейшим механизмом убыли колебательной энергии является превращение ее в теплоту вследствие трения в механических системах и потерь энергии в активных сопротивлениях в электрических системах. В последних затухание колебаний происходит также в результате излучения электромагнитных волн.

Затухание нарушает периодичность колебаний, поэтому они уже не являются периодическим процессом и, строго говоря, к ним неприменимо понятие периода и частоты. Относительное уменьшение размаха колебаний за период характеризует декремент колебаний (см. с. 146).

• Нарастающие колебания — колебания с увеличивающимися во времени значениями размаха колеблющейся величины или ее производной по времени.



- Гармоника периодических колебаний (гармоника) — каждое слагаемое периодических колебаний, представляемых в виде суммы гармонических колебаний.

- Номер гармоники — целое число, равное отношению частоты гармоники к частоте анализируемых периодических колебаний.

- Спектр частот периодических колебаний (спектр частот) — совокупность частот гармоник периодических колебаний.

- Резонанс — изменение характеристик колебательной системы, наступающее при совпадении собственных частот друг с другом или с частотой вынуждающей силы.

Резонанс возможен также при наличии целочисленных соотношений между этими частотами.

В [72] дано следующее определение резонанса.

Резонанс — отклик колебательной системы осциллятора на периодическое воздействие с частотой, близкой к частоте ее собственных колебаний. При резонансе происходит резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний осциллятора.

### Физические величины, характеризующие колебания<sup>1</sup>

- Фаза колебаний  $\varphi$  — аргумент функции, описывающей величину, изменяющуюся по закону гармонического колебания [12].

Так, в уравнении гармонического колебания вида

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

выражение, стоящее в скобках  $(\omega t + \varphi)$ , — фаза гармонических колебаний.

Фаза гармонических колебаний — величина безразмерная и выражается в радианах:

$$\dim(\omega t + \varphi) = 1, \quad [(\omega t + \varphi)] = 1 \text{ рад}^2.$$

- Начальная фаза гармонических колебаний (начальная фаза)  $\varphi$ ,  $\theta$  — значение фазы гармонических колебаний в начальный момент времени.

Размерность и единица начальной фазы:

$$\dim \varphi = 1, \quad [\varphi] = 1 \text{ рад}.$$

<sup>1</sup> Наименования величин и их определения соответствуют [12, 62], определения единиц физических величин — [53].

<sup>2</sup> См. с. 44, 45.

- Период колебаний  $T$  — интервал времени, в течение которого фаза гармонических колебаний изменяется на  $2\pi$  [12].

- Период колебаний (период)  $T$ ,  $\tau$  — наименьший интервал времени, через который повторяется состояние механической системы, характеризующееся значениями обобщенных координат и их производных [62].

\* Здесь для некоторых величин дается два определения: одно — из [62], учитывающего специфику механических колебаний, и второе — из [12], относящееся к электромагнитным колебаниям.

Размерность и единица периода колебаний:

$$\dim T = T, \quad [T] = 1 \text{ с}.$$

- Частота периодических колебаний  $f$ ,  $\nu$  — число периодов колебаний в единицу времени [62].

В [12] дано иное определение: частота колебаний  $f$ ,  $\nu$  — величина, обратная периоду.

Размерность и единица частоты периодических колебаний:

$$\dim f = T^{-1}, \quad [f] = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Эта единица получила наименование — герц (Гц).

Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с совершается один цикл периодического процесса.

Рекомендуемые кратные единицы частоты: ТГц, ГГц, МГц и кГц.

- Угловая частота гармонических колебаний (угловая частота. Нрк. круговая частота, циклическая частота)  $\omega$  — производная по времени от фазы гармонических колебаний, равная частоте, умноженной на  $2\pi$ .

В [12] дано более лаконичное определение: угловая частота  $\omega$  — величина, равная произведению частоты колебаний на  $2\pi$ :

$$\omega = 2\pi f.$$

Размерность и единица угловой частоты:

$$\dim \omega = T^{-1}, \quad [\omega] = 1 \text{ рад/с}.$$

- Амплитуда гармонического колебания (амплитуда)  $A$  — наибольшее по модулю отклонение колеблющейся величины от ее среднего значения при гармонических колебаниях [62].



Амплитуда колебаний  $A$  — наибольшее абсолютное значение величины, изменяющейся по закону гармонического колебания [12].

Амплитуды колебаний допускается обозначать буквой, представляющей соответствующую величину, с подстрочным индексом  $m$ ; например, в случае напряженности электрического поля излучения —  $E_m$  [12].

Размерность и единица амплитуды соответствуют размерности и единице величины, совершающей колебания. Так, например, при колебаниях груза, подвешенного на пружине, колеблющейся величиной является смещение  $x$ . В этом случае размерность и единица амплитуды:

$$\dim A = L; [A] = 1 \text{ м или } [x_m] = 1 \text{ м.}$$

При колебаниях математического маятника одной из колеблющихся величин является угол  $\alpha$ . В этом случае амплитуда — величина безразмерная и выражается в радианах:

$$\dim A = 1, [A] = 1 \text{ рад или } \dim \alpha_m = 1, [\alpha_m] = 1 \text{ рад.}$$

- Размах  $h$  колеблющейся величины (размах. Нрк. двойная амплитуда) — разность между наибольшим и наименьшим значениями колеблющейся величины в рассматриваемом интервале времени. Заметим, что размах — величина положительная и в зависимости от выбранного интервала времени может принимать значения от нуля до двух амплитуд ( $0 < h \leq 2A$ ). Размерность и единица размаха совпадают с размерностью и единицей колеблющейся величины.

- Сдвиг фаз гармонических колебаний (сдвиг фаз) — разность фаз двух гармонических колебаний с одинаковой частотой.

- Комплексная амплитуда гармонических колебаний (комплексная амплитуда)  $A$  — комплексная величина, модуль которой равен амплитуде, а аргумент — начальной фазе гармонических колебаний.

- Резонансная частота — частота, соответствующая одному из максимумов амплитудно-частотной характеристики.

- Антирезонансная частота — частота, соответствующая одному из минимумов амплитудно-частотной характеристики.

- Собственная частота  $f_c$ ,  $\omega_c$  — каждая из частот свободных колебаний линейной колебательной системы.

\* Различают собственную частоту консервативной колебательной системы и собственную частоту колебательной системы с линейным демпфированием.

- Динамическая жесткость  $D$  линейной механической колебательной системы — отношение амплитуды гармонической вынуждающей силы к амплитуде гармонических вынужденных колебаний:

$$D = F_m / A.$$

Размерность и единица динамической жесткости:

$$\dim D = MT^{-2}, [D] = 1 \text{ Н/м.}$$

*Ньютон на метр* — динамическая жесткость линейной механической системы, при которой вынуждающая гармоническая сила с амплитудой 1 Н вызывает в этой системе гармонические колебания с амплитудой 1 м.

- Динамическая податливость  $e$  линейной механической колебательной системы — величина, обратная динамической жесткости:

$$e = \frac{1}{D}.$$

Размерность и единица динамической податливости:

$$\dim e = M^{-1}T^2, [e] = 1 \text{ м/Н.}$$

*Метр на ньютон* — динамическая податливость линейно-механической системы, динамическая жесткость которой 1 Н/м.

- Комплексная динамическая жесткость (комплексная жесткость)  $D_{i,\omega}$ ,  $D$  — отношение гармонической вынуждающей силы к комплексной амплитуде гармонических вынужденных колебаний.

- Комплексная динамическая податливость (комплексная податливость) — величина, обратная комплексной динамической жесткости.

- Коэффициент динамичности по перемещению  $K_{дин}$ ,  $K_d$  — величина, равная отношению амплитуды  $A$  гармонических вынужденных колебаний к статическому перемещению под действием силы, равной амплитуде силового гармонического возбуждения или амплитуде кинематического гармонического возбуждения.

- Критический коэффициент демпфирования  $\delta_k$ ,  $\gamma_k$  — значение коэффициента демпфирования, при



превышении которого механическая система перестает быть колебательной.

- Коэффициент динамичности по ускорениям  $K_{\text{уск}}$ ,  $K_y$  — отношение амплитуды ускорения гармонических вынужденных колебаний к амплитуде ускорения кинематического гармонического возбуждения.

- Логарифмический декремент колебаний (логарифмический декремент. Нрк. логарифмический декремент затуханий)  $\Lambda$ ,  $\Theta$  — безразмерная величина, равная натуральному логарифму отношения двух последовательных максимальных или минимальных значений колеблющейся величины при затухающих свободных колебаниях [25]:

$$\Lambda = \ln A(t)/A(t+T),$$

где  $A$  — максимальное значение колеблющейся величины.

Из приведенного определения следует, что логарифмический декремент колебаний — величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах:

$$\dim \Lambda = 1, [\Lambda] = 1.$$

- Добротность  $Q$  — величина, характеризующая резонансные свойства линейной колебательной системы, равная отношению резонансной частоты  $\omega$  к ширине резонансной кривой  $\Delta\omega$  на уровне убывания амплитуды в  $\sqrt{2}$  раз [72]:

$$Q = \omega / \Delta\omega.$$

Принято также выражать добротность системы, совершающей затухающие колебания, произведением  $2\pi$  на отношение энергии  $W(t)$  системы в произвольный момент времени  $t$  к убыли этой энергии за один период  $T$ :

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)}.$$

В системах со слабозатухающими колебаниями, т. е. с большой добротностью, последняя связана с логарифмическим декрементом колебаний системы соотношением

$$Q = \pi / \Lambda.$$

Заметим также, что добротность контура тем выше, чем больше число колебаний  $N_e$  совершит

система за время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшится в  $e$  раз:

$$Q = e N_e,$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Из приведенных выше формул следует, что добротность — величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах.

Добротность колебательного электрического контура определяется по формуле

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где  $L$  — индуктивность,  $C$  — емкость,  $R$  — активное сопротивление контура.

Добротность механической колебательной системы

$$Q = \sqrt{mk}/b,$$

где  $m$  — масса системы,  $k$  — коэффициент упругости,  $b$  — коэффициент сопротивления системы.

## § 6.2

### ВОЛНЫ

- Волны — изменения состояния среды (возмущения), распространяющиеся в этой среде и несущие с собой энергию. Наиболее важные и часто встречающиеся виды волн — упругие волны, волны на поверхности жидкости и электромагнитные волны. Частными случаями упругих волн являются звуковые и сейсмические волны, а электромагнитных — радиоволны, свет, рентгеновские и другие излучения.

Основное свойство всех волн независимо от их природы состоит в том, что в волнах осуществляется перенос энергии без переноса вещества (последний может иметь место лишь как побочное явление) [72].

### Общие понятия<sup>1</sup>

- Бегущая волна (волна) — распространение возмущения в среде. Величину, служащую мерой состояния среды (перемещение, напряжение, деформацию

<sup>1</sup> Терминология и определения понятий соответствуют [12, 25, 62].



и т. п.), в случае постоянной скорости волны можно представить в виде функции

$$F = F_1(q) F_2(q - ct),$$

где  $q$  — пространственная координата, вдоль которой происходит распространение волны,  $t$  — время,  $c$  — постоянная скорость распространения волны.

- Гармоническая волна — волна, при которой все точки среды совершают гармонические колебания.
- Волновая поверхность гармонической волны — односвязная поверхность в среде, представляющая собой геометрическое место синфазно колеблющихся точек среды при гармонической бегущей волне.
- Фронт волны — самая далекая (в данный момент) волновая поверхность, куда дошла волна к этому моменту.
- Плоская волна — волна, фронт которой представляет собой плоскость, перпендикулярную направлению распространения волны.
- Цилиндрическая волна — волна, фронт которой представляет собой цилиндрическую поверхность с радиусом, совпадающим с направлением распространения волны.
- Сферическая волна — волна, фронт которой представляет сферическую поверхность с радиусом, совпадающим с направлением распространения волны.
- Продольная волна — волна, направление распространения которой коллинеарно траекториям колеблющихся точек среды.
- Поперечная волна — волна, направление распространения которой ортогонально траекториям колеблющихся точек среды.
- Стоячая волна — состояние среды, при котором расположение максимумов и минимумов перемещений колеблющихся точек не меняется во времени. Стоячую волну можно рассматривать как результат наложения двух одинаковых бегущих волн, распространяющихся навстречу одна другой.
- Приведем также определение стоячей волны, которое дается в [72]: стоячая волна — периодическое или квазипериодическое во времени синфазное колебание с характерным пространственным распределением амплитуды — чередованием узлов и пучностей (максимумов). В линейных системах стоячая волна

может быть представлена как сумма двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу. Простейший пример стоячей волны — плоская звуковая стоячая волна внутри наполненной воздухом трубы (например, органной) при закрытом (с идеально твердой стенкой) и открытом концах.

- Узел колебаний (узел) — неподвижная точка среды при стоячей волне. Совокупность таких точек может образовать узловую линию и узловую поверхность.
- Пучность колебаний (пучность) — точка среды при стоячей волне, в которой размах перемещений имеет максимум. Совокупность таких точек может образовать линию пучности и поверхность пучности.

### Электромагнитные волны<sup>1</sup>

- Электромагнитные волны — электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью.
- Электромагнитные колебания — взаимосвязанные колебания электрического и магнитного полей, составляющих единое электромагнитное поле. Распространение электромагнитных колебаний происходит в виде электромагнитных волн.
- \* В квазистационарных системах, размеры которых меньше длины волны, области, где преобладают электрические и магнитные поля, могут быть пространственно разделены и сосредоточены в отдельных элементах: электрическое поле в емкостях, магнитное поле в индуктивностях. Типичный пример системы с сосредоточенными параметрами — колебательный контур, где происходят колебания зарядов на обкладках конденсаторов и токов в катушках самоиндукции.
- Источники электромагнитных волн — изменяющиеся со временем электрические заряды и электрические токи.

Пространственное распределение электромагнитных полей, временные зависимости напряженности электрического поля  $E(t)$  и напряженности магнитного поля  $H(t)$ , определяющие тип волны (плоские, сферические и др.), зависят от характера источника волн, с одной стороны, и от свойств среды, в которой

<sup>1</sup> Терминология и определения величин и других понятий соответствуют [12]. Использована также терминология и определения понятий из [72].



распространяются волны,—с другой. В случае однородной и изотропной среды вдали от источников зависимость  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  от времени определяется волновыми уравнениями

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2},$$

где  $\nabla$  — оператор Лапласа,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды,  $\mu$  — магнитная проницаемость среды.

Решениями этих уравнений для случая плоских монохроматических электромагнитных волн являются функции

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos(kr - \omega t + \varphi),$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \cos(kr - \omega t + \varphi),$$

где  $\mathbf{E}_0$  и  $\mathbf{H}_0$  — амплитуды напряженности электрического и магнитного полей,  $\omega = 2\pi\nu$  — угловая частота колебаний,  $\varphi$  — произвольный сдвиг фаз,  $\mathbf{k}$  — волновой вектор,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор точки.

Векторы  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{k}$  взаимно перпендикулярны и образуют правовинтовую систему.

● Электромагнитное излучение — электромагнитные волны, испущенные каким-либо источником, свободно распространяющиеся в пространстве и ничем уже не связанные с источником, образовавшим эти волны.

\* Процесс испускания электромагнитных волн тоже называют электромагнитным излучением. Но из контекста всегда можно понять, в каком смысле применяется термин «электромагнитное излучение».

● Интерференция — явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух (или нескольких) волн.

● Интерференционная картина — пространственное распределение интенсивности излучения, получающееся в результате интерференции в месте ее наблюдения.

● Дифракция волн — совокупность явлений, наблюдаемых при прохождении волн в неоднородных средах, приводящих к отклонению волн от первоначального прямолинейного распространения.

● Дифракция Фраунгофера — дифракция, наблюдаемая на таких расстояниях, при которых угловые

размеры неоднородности много меньше отношения длины волны к линейным размерам этой неоднородности.

● Дифракция Френеля — дифракция, наблюдаемая на таких расстояниях, при которых угловые размеры неоднородностей много больше отношения длины волны к линейным размерам этих неоднородностей.

● Лучеиспускание — процесс излучения.

● Облучение — падение электромагнитного излучения на объект.

● Отражение — возвращение электромагнитного излучения объектом без изменения частот составляющих его монохроматических излучений.

● Пропускание — прохождение излучения сквозь среду без изменения частот составляющих его монохроматических излучений.

● Поглощение — превращение энергии излучения в другую форму энергии в результате взаимодействия с веществом.

● Рассеяние — изменение пространственного распределения пучка лучей, отклоняемых во множестве направлений поверхностью или средой без изменения частот составляющих его монохроматических излучений.

● Рэлеевское рассеяние (в среде) — рассеяние излучения при его прохождении через среду, содержащую частицы, размеры которых много меньше длины волны.

● Преломление — изменение направления распространения излучения вследствие изменения скорости его распространения в оптически неоднородной среде или при переходе из одной среды в другую.

● Дисперсия — явление изменения скорости распространения излучения в зависимости от его частоты, в результате которого можно получить разложение сложного излучения на составляющие его монохроматические излучения.

● Точечный источник — источник излучения, размеры которого настолько малы по сравнению с расстоянием до приемника, что ими можно пренебречь в вычислениях.

● Равномерный точечный источник — точечный источник, равномерно излучающий во всех направлениях.



# • Спектр электромагнитных волн

Частота $\nu$ , Гц	Длина волны $\lambda$ , м	Диапазон длин волн	Источники. Основные методы возбуждения
$10^3 - 10^{12}$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{-4}$	Радиоволны	Переменные токи в проводниках и электронных потоках (генераторы радиочастот, генераторы СВЧ)
$10^{12} - 3,75 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	ИК-излучение	Излучение молекул и атомов при тепловых и энергетических воздействиях
$3,75 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	Видимый свет	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	УФ-излучение, мягкий рентген	Излучение атомов при воздействии ускоренных электронов
$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{20}$	$10^{-9} - 10^{-12}$	Рентген, $\gamma$ -излучение	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
$3 \cdot 10^{20} - 10^{23}$	$10^{-12} - 3 \cdot 10^{-15}$	$\gamma$ -излучение	Ядерные процессы, радиоактивный распад, космические процессы

## Величины, характеризующие волны<sup>1</sup>

• Длина гармонической волны (длина волны)  $\lambda$  — расстояние между двумя соседними максимумами или минимумами перемещения точек среды. В [72] дано такое определение длины волны: длина волны — пространственный период волны, т. е. расстояние между двумя ближайшими точками гармонической бегущей волны, находящимися в одинаковой фазе колебаний, или удвоенное расстояние между двумя ближайшими узлами или пучностями стоячей волны.

Длина волны связана с периодом колебаний  $T$  и фазовой скоростью  $v$  распространения волны в данном направлении соотношением

$$\lambda = vT.$$

<sup>1</sup> Терминология и определения величин соответствуют [12, 62].

Длина электромагнитной волны в среде равна отношению длины волны  $\lambda_0$  в вакууме к показателю преломления среды  $n$ :

$$\lambda = \lambda_0 / n.$$

Обычно значения длин волн даются для воздуха. Во всех других случаях указывается среда.

• Показатель преломления нормального воздуха (15° С, 101 325 Па) для видимого излучения лежит в пределах от 1,00027 до 1,00029.

Размерность и единица длины волны:

$$\dim \lambda = L, [\lambda] = 1 \text{ м.}$$

• Волновой вектор  $k$  — вектор, направление которого совпадает с направлением распространения бегущей волны.

В изотропных средах вдоль волнового вектора направлены групповая скорость и плотность потока энергии.

Модуль  $k$  волнового вектора называется волновым числом. Он связан с угловой частотой  $\omega$ , фазовой скоростью  $v$  и длиной волны  $\lambda$  соотношением

$$k = 2\pi/\lambda = \omega/v.$$

Размерность и единица волнового вектора и волнового числа:

$$\dim k = L^{-1}, [k] = 1 \text{ м}^{-1}.$$

\* В физической оптике волновым числом называют величину, обратную длине волны, и обозначают  $\nu$ ,  $\sigma$  [12]:

$$\nu = 1/\lambda.$$

• Интенсивность излучения  $I$  — величина, пропорциональная квадрату амплитуды электромагнитного колебания.

• Энергия излучения  $Q$ ,  $W$  — энергия, переносимая излучением.

• Скорость электромагнитного излучения в вакууме  $c$  — скорость переноса энергии излучения в вакууме.

• Фазовая скорость  $v$  — скорость распространения поверхности равной фазы для монохроматического излучения.

\* Монохроматическим называется излучение, которое с достаточным приближением может быть охарактеризовано одним значением частоты (длины волны, волнового числа).



- Групповая скорость  $u$  — скорость распространения характерной точки на огибающей группы волн, близких по частоте.

Групповая скорость совпадает со скоростью переноса энергии излучения группой волн.

В недиспергирующих средах групповая скорость совпадает с фазовой скоростью.

- Электрический вектор излучения  $E$  — вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны.

- Магнитный вектор излучения  $H$  — вектор напряженности магнитного поля электромагнитной волны.

- Вектор Пойнтинга  $S$  — величина, равная произведению напряженности  $E$  электрического поля на напряженность  $H$  магнитного поля электромагнитной волны:

$$S = [E \cdot H].$$

Вектор Пойнтинга характеризует перенос энергии и может быть выражен равенством

$$S = \frac{W/t}{A}, \quad (6.1)$$

где  $W$  — энергия, переносимая электромагнитной волной за время  $t$  через поверхность площадью  $A$ , перпендикулярную направлению распространения энергии.

Размерность и единица вектора Пойнтинга:

$$\dim S = MT^{-3}, \quad [S] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

## Глава 7

### АКУСТИКА<sup>1</sup>

#### § 7.1

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- Акустика в узком смысле слова — учение о звуке, т. е. об упругих колебаниях и волнах в газах, жидкостях и твердых телах, слышимых человеческим ухом, в широком смысле слова — область физики, исследующая упругие колебания и волны от самых низких частот (условно от 0 Гц) до предельно высоких частот  $10^{12}$ — $10^{13}$  Гц, их взаимодействия с веществом и применения этих колебаний (волн).
- Упругие волны — упругие возмущения, распространяющиеся в твердой, жидкой и газообразной средах, например волны, возникающие в земной коре при землетрясении, звуковые и ультразвуковые волны в жидких, газообразных и твердых телах.

При распространении упругих волн в среде возникают механические деформации сжатия и сдвига, которые переносятся волнами из одной точки среды в другую. При этом происходит перенос энергии упругой деформации в отсутствие потока вещества.

В жидкостях и газах, которые обладают упругостью объема, но не обладают упругостью формы, могут распространяться только продольные разрежения — сжатия, где колебания частиц среды происходят в направлении распространения волны.

- Звук (в широком смысле) — колебательное движение частиц упругой среды, распространяющееся в виде упругих волн в газообразной, жидкой и твердой средах; в узком смысле — явление, субъективно воспринимаемое специальным органом чувств человека и животных. Физическое понятие о звуке охватывает как слышимые, так и неслышимые звуки.

<sup>1</sup> Терминология, определения акустических величин и других понятий соответствуют [4, 46], определения единиц физических величин — [15, 53].



- Звуковое поле — область в упругой среде, в которой имеются звуковые волны. Понятие «звуковое поле» применяется обычно для областей, размеры которых порядка или больше длины звуковой волны.
- Частица — часть среды, объем которой имеет размеры, малые по сравнению с длиной звуковой волны.
- Акустические колебания — движение частиц упругой среды около положения равновесия.
- Слышимый звук — акустические колебания, способные вызывать слуховое ощущение. Человек слышит звук с частотой от 16 Гц до 20 кГц.
- Инфразвук — акустические колебания с частотой ниже 16 Гц. Область инфразвуковых частот снизу практически не ограничена — в природе встречаются инфразвуковые колебания с частотой в десятые и сотые доли герца.
- Ультразвук — акустические колебания с частотой от 20 000 Гц до  $10^9$  Гц.
- Гиперзвук — акустические колебания от  $10^9$  до  $10^{12}$ — $10^{13}$  Гц. Частотный диапазон гиперзвуковых волн сверху ограничивается физическими факторами, характеризующими атомное и молекулярное строение среды: длина упругой волны должна быть значительно больше длины свободного пробега молекул в газах и больше межатомных расстояний в жидких и твердых телах. Поэтому в воздухе не может распространяться гиперзвук с частотой  $10^9$  и выше, а в твердых телах — с частотой более  $10^{12}$ — $10^{13}$  Гц.
- Чистый звук (чистый тон) — синусоидальное акустическое колебание.
- Сложный звук — звук, не являющийся чистым тоном.
- Воющий тон — звук, частота которого периодически изменяется около среднего значения.
- Шум — звук, имеющий сплошной спектр или линейчатый спектр с негармоническими составляющими.
- Спектр звука — представление амплитуд (а иногда и фаз) сложного звука в функции частоты.
- Линейчатый спектр — спектр звука, составляющие которого непрерывно распределены в некотором диапазоне частот.
- Простой источник звука (монополь) — источник звука, излучающий равномерно во всех направлениях.

- Точечный источник звука — источник звука, излучающий как бы из одной точки.
- Мода колебания — характерная картина системы при колебаниях, когда движение каждой частицы — простое гармоническое колебание с одной и той же частотой.
- Собственная частота системы — частота колебаний системы. В случае системы со многими степенями свободы собственные частоты — это частоты нормальных мод колебаний.
- Резонансная частота — частота, при которой существует резонанс. Если возможна неопределенность, то следует указать тип резонанса, например частоту резонанса скорости.
- Акустическая дифракция (дифракция звука) — явление, при котором изменяется направление звуковой волны в результате огибания препятствий, захождения звуковых волн в область акустической тени.
- Реверберация — процесс воспроизведения звука, который после выключения источника звука продолжает существовать в пространстве как результат отражений или рассеяний.
- Фонон — квазичастица, сопоставляемая волне смещений атомов (ионов) и молекул кристалла из положения равновесия. Оказалось, что имеется глубокая аналогия между светом и упругими волнами в кристаллах; для последних также имеет место дискретность энергии. По аналогии со световыми квантами (фотонами) кванты энергии упругих колебаний в кристаллах были названы фононами.

## § 7.2

### АКУСТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- Мгновенное колебательное смещение частицы  $\mathbf{r}$  — вектор, конец которого совпадает с положением частицы в упругой среде в данный момент, а начало — с положением частицы в момент равновесия. Размерность и единица смещения частицы:

$$\dim r = L, [r] = 1 \text{ м.}$$

- Колебательное смещение частицы (колебательное смещение)  $\sigma$  — среднее квадратическое значение мгновенного колебательного смещения в данном интервале времени:



$$\sigma = \sqrt{\frac{(r_1 - \langle r \rangle)^2 + (r_2 - \langle r \rangle)^2 + \dots + (r_n - \langle r \rangle)^2}{N}},$$

где  $\langle r \rangle = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{N}$  — среднее арифметическое мгновенных колебательных смещений всех  $N$  колебаний, совершившихся в течение данного интервала времени.

● Пиковое колебательное смещение частицы (пиковое колебательное смещение)  $r_{\max}$  — наибольшее значение мгновенного колебательного смещения в данном интервале времени.

● Мгновенная колебательная скорость частицы (мгновенная колебательная скорость)  $v_k$  — производная мгновенного колебательного смещения по времени:

$$v_k = dr/dt.$$

Размерность и единица колебательной скорости:

$$\dim v_k = LT^{-1}, [v_k] = 1 \text{ м/с}.$$

● Колебательная скорость частицы (колебательная скорость)  $\langle v \rangle$  — среднее квадратическое значение мгновенной колебательной скорости.

● Объемная скорость  $v_V$  — интеграл по поверхности, совершающей колебания, от произведения нормальной к поверхности составляющей колебательной скорости на площадь элемента поверхности:

$$v_V = \int v_k \cos \alpha dS.$$

Размерность и единица объемной скорости:

$$\dim v_V = L^3 T^{-1}, [v_V] = 1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Кубический метр в секунду равен объемной скорости звука при колебательной скорости 1 м/с и площади поперечного сечения канала 1 м<sup>2</sup>.

Соотношения между единицами объемной скорости в системе СГС и в СИ<sup>1</sup>:

$$1 \text{ см}^3/\text{с} = 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

● Скорость звука  $v$  — фазовая скорость звуковых волн в упругой среде. Скорость звука выражается в метрах в секунду и имеет размерность

$$\dim v = LT^{-1}.$$

● Статическое давление  $p_c$  — давление в некоторой точке среды, которое существовало бы в этой точке при отсутствии звуковых волн.

● Звуковое давление  $p$  — переменная часть давления, возникающая при прохождении звуковой волны в среде. Распространяясь в среде, звуковая волна образует ее сгущения и разрежения, которые создают добавочные изменения давления по отношению к его средним значениям в среде.

Звуковое давление является наиболее важной характеристикой звука. Это связано с тем, что из всех величин, характеризующих звук, человеческое ухо воспринимает именно звуковое давление.

Звуковое давление определяется по формуле

$$p = p_0 \sin \omega t,$$

где  $\omega = 2\pi/T$  — угловая частота,  $p_0$  — амплитуда звукового давления.

Звуковое давление, как и любое другое давление, выражается в паскалях и имеет размерность  $L^{-1}MT^{-2}$ .

Рекомендуемые дольные единицы звукового давления: мПа, мкПа.

Соотношение между единицами звукового давления в системе СГС и СИ:

$$1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}.$$

● Акустическое радиационное давление  $p_a$  — постоянное давление, испытываемое телом, находящимся в стационарном звуковом поле. Это давление пропорционально плотности звуковой энергии. Оно мало по сравнению с звуковым давлением.

● Звуковая энергия  $W$  — энергия колебательного движения частиц упругой среды, заполняющей область звукового поля.

Как и любая другая энергия, звуковая энергия выражается в джоулях и имеет размерность  $L^2MT^{-2}$ .

● Плотность звуковой энергии  $w$  — физическая величина, равная отношению звуковой энергии  $\Delta W$ , содержащейся в некоторой области звукового поля, к объему  $\Delta V$  этой области:

$$w = \Delta W / \Delta V.$$

<sup>1</sup> В соответствии с [15] для измерения акустических величин допускалось применение системы СГС. Поэтому здесь и в ряде других случаев приводится соотношение между акустическими единицами в системе СГС и СИ.



Размерность и единица плотности звуковой энергии:

$$\dim w = L^{-1}MT^{-2}, [w] = 1 \text{ Дж/м}^3.$$

Джоуль на кубический метр равен плотности звуковой энергии в канале объемом  $1 \text{ м}^3$  при звуковой энергии  $1 \text{ Дж}$ .

● Поток звуковой энергии (звуковая мощность)  $\Phi$  через элемент поверхности — усредненное по времени произведение совпадающих по фазе компонент мгновенного звукового давления на объемную колебательную скорость через рассматриваемый элемент поверхности:

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2} \frac{p v_v dt}{\Delta t},$$

где  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

Поток звуковой энергии, так же как и мощность, выражается в ваттах и имеет размерность

$$\dim \Phi = L^2MT^{-3}.$$

Рекомендуемые кратные и дольные единицы потока звуковой энергии: кВт, мВт, мкВт, пВт.

● Интенсивность звука (плотность звуковой мощности)  $I$  — величина, равная отношению потока звуковой энергии  $d\Phi$  в определенном направлении через поверхность, перпендикулярную этому направлению, к площади  $dS$  поверхности:

$$I = \frac{d\Phi}{dS}.$$

При равномерном распределении потока звуковой энергии по поверхности эта формула примет вид

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}.$$

Размерность и единица интенсивности звука:

$$\dim I = \frac{L^2MT^{-3}}{L^2} = MT^{-3}, [I] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

Ватт на квадратный метр равен интенсивности звука в канале при потоке звуковой энергии  $1 \text{ Вт}$  и площади поперечного сечения канала  $1 \text{ м}^2$ .

Интенсивность звука связана с звуковым давлением и скоростью частиц соотношением

$$I = \frac{p v}{2} \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  — фазовый угол между направлением силы давления и скоростью частиц.

Рекомендуемые дольные единицы интенсивности звука: мВт/м<sup>2</sup>, мкВт/м<sup>2</sup>, пВт/м<sup>2</sup>.

Соотношение между единицами интенсивности звука в системе СГС и в СИ:

$$1 \text{ эрг/(с·см}^2) = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2.$$

● Акустическое сопротивление (акустический импеданс)  $Z_a$  — комплексная величина, выражаемая соотношением

$$Z_a = \operatorname{Re} Z_a + i \operatorname{Im} Z_a,$$

где  $\operatorname{Re} Z_a$  — действительная часть комплексного акустического сопротивления, связанная с диссипацией энергии в самой системе и с затратами энергии на излучение звука и называемая активным акустическим сопротивлением,  $\operatorname{Im} Z_a$  — мнимая часть комплексного акустического сопротивления, обусловленная реакцией сил упругости и инерции и называемая реактивным акустическим сопротивлением.

● Активное акустическое сопротивление  $\operatorname{Re} Z_a$  — величина, равная отношению амплитуды  $p_0$  звукового давления к объемной колебательной скорости звука  $v_v$ :

$$\operatorname{Re} Z_a = \frac{p_0}{v_v}.$$

Размерность и единица акустического сопротивления:

$$\dim Z_a = \frac{L^{-1}MT^{-2}}{L^3T^{-1}} = L^{-4}MT^{-1},$$

$$[Z_a] = \frac{1 \text{ Па}}{1 \text{ м}^3/\text{с}} = 1 \text{ Па·с/м}^3.$$

Паскаль-секунда на кубический метр равен акустическому сопротивлению канала, в котором создается объемная скорость  $1 \text{ м}^3/\text{с}$  при звуковом давлении  $1 \text{ Па}$ .



Соотношение между единицами акустического сопротивления в системе СГС и в СИ:

$$1 \text{ дин} \cdot \text{с/см}^5 = 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3.$$

- Удельное акустическое сопротивление  $z_s$  — величина, равная произведению акустического сопротивления на площадь сечения канала, в котором распространяется звуковая волна:

$$z_s = Z_a S.$$

Размерность и единица удельного акустического сопротивления:

$$\dim z_s = L^{-4} M T^{-1} L^2 = L^{-2} M T^{-1},$$

$$[z_s] = 1 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3 \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Па} \cdot \text{с/м}.$$

Паскаль-секунда на метр равен удельному акустическому сопротивлению канала площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ , имеющего акустическое сопротивление  $1 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$ .

- Механическое сопротивление  $Z_m$  — величина, равная отношению силы  $F$ , с которой система действует на среду, к колебательной скорости  $v_k$  частицы:

$$Z_m = F/v_k.$$

Размерность и единица механического сопротивления:

$$\dim Z_m = \frac{L M T^{-2}}{L T^{-1}} = M T^{-1},$$

$$[Z_m] = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м/с}} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

Ньютон-секунда на метр равен механическому сопротивлению канала, в котором при силе  $1 \text{ Н}$  возникает колебательная скорость  $1 \text{ м/с}$ .

Соотношение между единицами механического сопротивления в системе СГС и СИ:

$$1 \text{ дин} \cdot \text{с/см} = 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

### § 7.3

#### УРОВНИ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Некоторые акустические величины, определяющие восприятие звука человеком (интенсивность звука, звуковое давление, затухание звуковых волн и др.), подчиняются законам, имеющим экспоненциальный

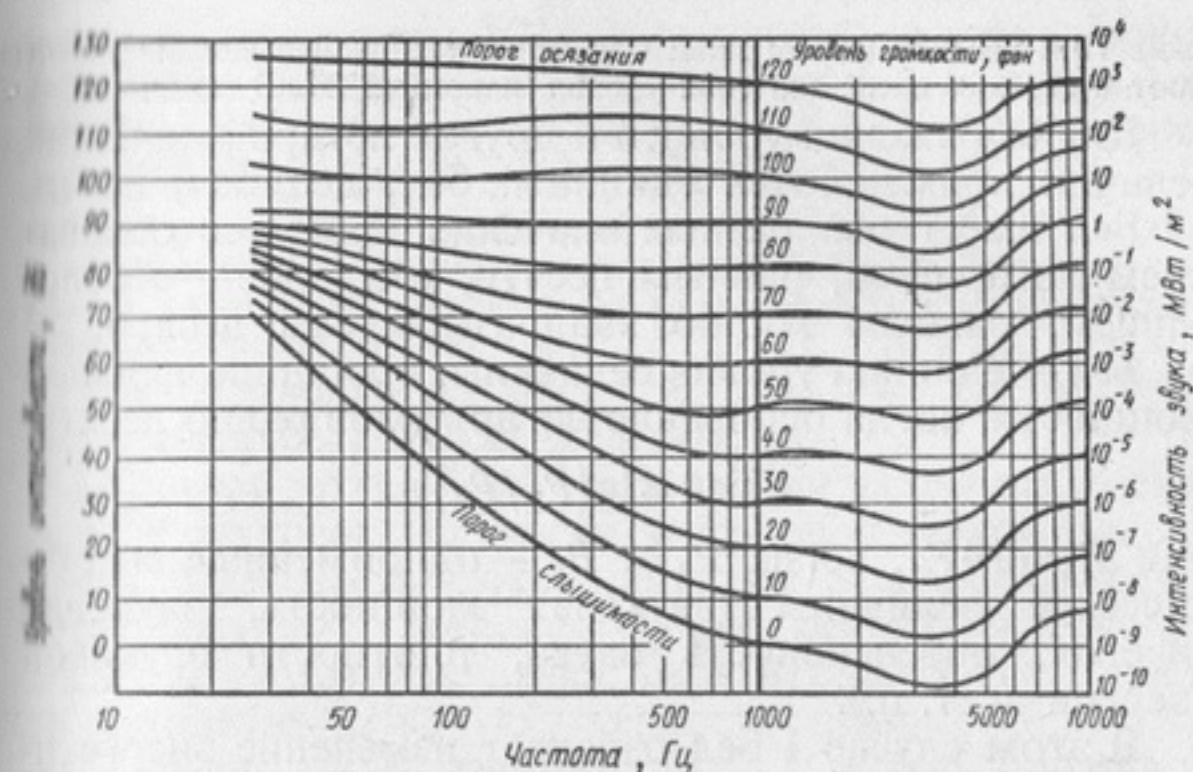


Рис. 7.1. Кривые равной громкости

Выражают зависимость уровня звукового давления (в децибелах) от частоты при заданной громкости (в фонах). Каждая кривая — порог слышимости, верхняя — порог болевого ощущения

характер. Изменения значения этих величин пропорциональны самим величинам в данной точке или в данный момент времени и могут отличаться по размеру на несколько порядков.

Для выражения этих величин, говоря точнее — для выражения уровня этих величин, существуют особые единицы.

- Уровень физической величины — логарифм отношения данного значения  $X$  величины к пороговому (исходному) значению  $X_0$  этой величины:

$$\text{уровень величины} = \lg X/X_0,$$

например уровень интенсивности звука — десятичный логарифм отношения данного значения интенсивности звука  $I$  к пороговому значению  $I_0$  интенсивности звука (обычно принимают  $I_0 = 0,01 \text{ Вт/м}^2$ ).

При применении уровня величины указываются основание логарифмов (десять, корень квадратный из десяти, два и т. д.), пороговое значение величины и вид уровня (уровень звукового давления, уровень интенсивности звука и т. п.).

\* В соответствии с публикацией 27-3 Международной электротехнической комиссии (МЭК) при необходимости указать исходную величину ее значение помещают в скобках после обозначения логарифмической величины; для уровня звукового давления  $L_p$  ( $\text{ре } 20 \text{ мкПа}$ ) = 20 дБ ( $\text{ре}$  — начальные буквы слова reference, т. е. исход-



ный). При краткой форме записи значение исходной величины указывают в скобках после значения уровня, например 20 дБ (re 20 мкПа).

Для выражения уровней и других логарифмических величин применяются единицы: бел, децибел, непер.

Бел имеет два разных значения: одно — с основанием логарифма, равным десяти, и второе — с основанием, равным корню квадратному из десяти.

• *Бел* — единица уровня величины, пропорциональной мощности, когда основание логарифмов равно десяти:

$$1 \text{ бел} = \lg(P_2/P_1)$$

при  $P_2 = 10P_1$ , когда  $P_1$  и  $P_2$  — одноименные энергетические величины (звуковая мощность, звуковая энергия, интенсивность звука, плотность звуковой энергии и т. п.).

В этом случае 1 бел означает изменение энергетической величины в 10 раз.

• *Бел* — единица уровня силовой величины (звуковое давление, электрическое напряжение и т. п.), когда основание логарифмов равно квадратному корню из десяти:

$$1 \text{ бел} = 2 \log(F_2/F_1)$$

при  $F_2 = \sqrt{10}F_1$ , где  $F_1$  и  $F_2$  — одноименные силовые величины (сила звука, звуковое давление, напряженность электрического поля и т. п.).

В этом случае 1 бел означает изменение значения силы звука или другой силовой величины в  $\sqrt{10}$  раз.

• *Децибел* (дБ) — дольная единица бела (1 дБ = 0,1 Б); соответствует изменению интенсивности звука в  $10^{0,1}$  раза = 1,26 раза.

Хотя децибел является дольной единицей бела, но ввиду того, что он как единица употребляется чаще бела, децибел получил и самостоятельное определение независимо от бела. Приведем определение децибела из двух источников.

• *Децибел* — уровень звукового давления, двадцать десятичных логарифмов отношения которого к условному порогу давления, равному 0,00002 Па, принимаемому за пороговый уровень, равны единице [15].

• *Децибел* — уровень звукового давления  $p$ , для которого выполняется соотношение  $20 \lg(p/p_0) = 1$ , где  $p_0$  — пороговое звуковое давление, принимаемое равным  $2 \cdot 10^{-5}$  Па [72].

• *Непер* (Нп) — единица уровня силовой величины, когда употребляется логарифм при неперовском

основании  $e$ , равном 2,718. Неper также единица уровня величины подобной мощности, когда за основание логарифмов взят квадрат  $e$ , равный 7,389. Один непер равен 8,686 децибел (1 Нп = 0,8686 Б = 8,686 дБ).

\* Разрешено без ограничения срока применять в акустике логарифмические единицы, кроме непера. Неper может применяться временно до принятия по нему соответствующего международного решения [16].

Ниже приводятся рекомендации [46] по применению логарифмических величин.

• Уровень звуковой мощности — логарифм отношения данной звуковой мощности к исходной звуковой мощности. Уровень звуковой мощности в децибелах равен десятикратному логарифму при основании, равном десяти от этого отношения. Если нет другого указания, за исходную звуковую мощность принимают 1 пВт.

• Уровень интенсивности звука (уровень плотности потока звукового давления) — логарифм отношения данной интенсивности звука в указанном направлении к исходной интенсивности. Уровень интенсивности в децибелах равен десятикратному логарифму при основании, равном десяти от этого отношения. Если нет другого указания, за исходную интенсивность звука принимают 1 пВт/м<sup>2</sup>.

• Уровень звукового давления — логарифм отношения данного звукового давления к исходному звуковому давлению. Уровень звукового давления в децибелах равен двадцати логарифмам этого отношения при основании, равном десяти. Если нет другого указания, то за исходное звуковое давление в воздухе принимают 20 мкПа и 1 мкПа в других средах и предполагается, что звуковые давления выражены через средние квадратичные значения.

## § 7.4

### СУБЪЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ МУЗЫКАЛЬНОЙ АКУСТИКИ<sup>1</sup>

• *Громкость* звука — величина, характеризующая размер слухового ощущения для данного звука. Громкость звука сложным образом зависит от

<sup>1</sup> Терминология общих понятий и величин и их определения соответствуют [4, 46, 66].



звукового давления (от интенсивности звука), от частоты и формы звуковых колебаний. При неизменной частоте и форме колебаний громкость звука растет с увеличением звукового давления. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в интервале частот 1—5 кГц (см. рис. 7.1).

Громкость звука данной частоты оценивают, сравнивая ее с громкостью чистого тона частотой 1000 Гц, вводя для этого логарифмическую величину «уровень громкости».

- Уровень громкости звука (в фонах)—величина, численно равная уровню звукового давления (в децибелах) чистого тона частотой 1000 Гц столь же громкого (сравнивая на слух) как и измеряемый звук.

- Кривые уровней громкости—кривые, графически выражающие зависимость уровня громкости звука от уровня звукового давления и от частоты звука (см. рис. 7.1). Из рисунка видно, что для звука частотой 1000 Гц при любом уровне звукового давления (в децибелах) уровень громкости (в фонах) численно равен уровню звукового давления (в децибелах). Так, например, через точку пересечения вертикали, соответствующей частоте 1000 Гц и горизонтали, соответствующей уровню звукового давления 40 дБ, проходит кривая уровня громкости 40 фон.

- Порог слышимости—звуковое давление, при котором слышны самые слабые звуки данной частоты. Наименьший порог слышимости соответствует частотам в интервале 1—5 кГц. На рис. 7.1 порогу слышимости соответствует самая нижняя кривая.

- Порог болевого ощущения—звуковое давление, при котором нормальное слуховое ощущение переходит в болезненное раздражение органа слуха. Для частот 1—5 кГц порог болевого ощущения около 120 дБ. На рис. 7.1 порогу болевого ощущения соответствует самая верхняя кривая уровня громкости.

- Спектр звука—характеристика звука, получаемая в результате разложения звуковых колебаний на простые гармонические колебания. Спектр бывает сплошной, когда энергия звуковых колебаний непрерывно распределяется в более или менее широкой области частот, и линейчатый, когда имеется сово-

купность дискретных (прерывных) частотных составляющих.

- Музыкальные звуки—звуки, обладающие определенной высотой, тембром и громкостью и входящие в состав закономерно организованной музыкальной системы.

- Звукоряд—расположение звуков в последовательном порядке по возрастающей или убывающей высоте.

- Тон—звук определенной высоты; в простейшем случае—чистый тон, т. е. синусоидальное колебание данной частоты. Высота тона определяется частотой его гармонических колебаний.

- Обертоны—составляющие сложного колебания, выделенные при его анализе и имеющие более высокие частоты, чем основная составляющая (которая имеет определяющую высоту тона). Состав обертонов сложного звука определяет его качественную окраску.

- Тембр—качество звука (его окраска), позволяющее различать звуки одинаковой высоты, исполненные на различных инструментах или различными голосами. Тембр зависит от того, какие обертоны сопутствуют основному тону, какова интенсивность каждого из них.

- Гамма—последовательный ряд звуков (звукоряд, шкала) данной системы или лада в восходящем или нисходящем порядке, расположенный в пределах одной октавы.

- Интервал—соотношение двух звуков по высоте, т. е. частоте колебаний. Если звуки берутся поочередно, интервал называется мелодическим, если одновременно—гармоническим. Интервалы больше октавы рассматриваются как сумма октавы и простого интервала и называются простыми. Интервалы делятся на консонансы и диссонансы.

Математически интервалы равны отношению крайних частот, т. е. частот, ограничивающих интервал ( $f_1/f_2$ ).

Любые два звука воспринимаются человеком как равноотстоящие по высоте, если равны отношения их частот. Так, например, два звука с частотами  $f_1=400$  Гц и  $f_2=200$  Гц имеют такой же интервал, как и звуки с частотами  $f_1=300$  Гц и  $f_2=150$  Гц.



● **Октава** — интервал высоты, ограниченный частотами  $f_1$  и  $f_2$ , отношение которых равно двум ( $f_1/f_2 = 2$ ).

● **Цент** — интервал высоты, равный  $1/1200$  октавы (1 цент =  $1/1200$  октавы).

● **Савар** — интервал высоты, для которого десятичный логарифм отношения крайних частот колебаний равен 0,001. Интервал высоты, выраженный в саварах, определяется по формуле

$$\Delta = 1000 \lg(f_1/f_2).$$

● **Мел** — единица высоты тона. Фронтально приходящий чистый тон частотой 1000 Гц с уровнем звукового давления 40 дБ относительно 20 мкПа вызывает высоту тона 1000 мел.

● **Фон** — единица уровня громкости звука. Уровень громкости данного звука в фонах равен уровню звукового давления в децибелах для чистого тона частотой 1000 Гц, громкость которого при сравнении на слух равна громкости данного звука.

● **Сон** — единица условной шкалы громкости звука, выражающая непосредственно субъективную оценку сравнительной громкости чистого тона. 1 сон соответствует уровню громкости 40 фон при частоте звука 1000 Гц. Шкала громкости в сонах — линейная. При каждом последующем увеличении уровня громкости на 10 фон число единиц сонов приблизительно удваивается.

## Глава 8

### ОПТИКА

#### § 8.1

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ<sup>1</sup>

● **Электромагнитное излучение** — электромагнитные волны, испущенные каким-либо источником, свободно распространяющиеся в пространстве и ничем не связанные с источником, образовавшим эти волны.

\* Процесс испускания электромагнитных волн тоже называют электромагнитным излучением. Но из контекста всегда можно понять, в каком смысле применяется термин «электромагнитное излучение».

● **Оптическое излучение** — электромагнитное излучение, характеризующееся длинами волн, расположенными в диапазоне  $5 \cdot 10^{-9} - 10^{-3}$  м.

\* 1. В указанном диапазоне электромагнитные волны наиболее эффективно изучаются оптическими методами, для которых характерно формирование направленных потоков электромагнитных волн с помощью оптических систем.

2. В состав оптического излучения входят видимое излучение (свет), ультразвуковое излучение и инфракрасное излучение.

● **Видимое излучение (свет)<sup>2</sup>** — излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение. Видимое излучение характеризуется длинами волн, расположенными в диапазоне  $(4 - 7,6) \cdot 10^{-7}$  м.

\* Границы спектральной области видимого излучения условны и могут выбираться различными для разных применений. Нижняя граница считается обычно лежащей между 380 и 400 нм, верхняя — между 760 и 780 нм (1 нм =  $10^{-9}$  м).

● **Инфракрасное излучение** — оптическое излучение, характеризующееся длинами волн, расположенными в диапазоне  $7,6 \cdot 10^{-7} - 10^{-3}$  м.

\* Границы спектральной области инфракрасного излучения (ИК) условны и могут выбираться различными для разных применений. В спектральной области между 780 нм и 1 мм различают:

<sup>1</sup> Терминология, определения понятий, использованные в данном параграфе, соответствуют [12, 27].

<sup>2</sup> Госстандартом СССР принято специальное решение применять термин «свет» во всей научно-технической документации по стандартизации только для понятия «видимое излучение».



ИК-А — от 780 до 1400 нм  
 ИК-В — от 1,4 мкм до 3 мкм  
 ИК-С — от 3 мкм до 1 мм

- Ультрафиолетовое излучение — оптическое излучение, характеризующееся длинами волн, расположенными в диапазоне  $5 \cdot 10^{-9} - 4 \cdot 10^{-7}$  м.
- Монохроматическое излучение — излучение, характеризующееся одним значением частоты. В более широком смысле — излучение очень узкой области частот или длин волн, которое может быть охарактеризовано одним значением частоты или длины волны.
- Сложное излучение — излучение, состоящее из совокупности монохроматических излучений разных частот.
- Непрерывное оптическое излучение — оптическое излучение, существующее в любой момент времени.
- Импульсное оптическое излучение — оптическое излучение, существующее в интервале времени  $\tau$ , меньшем времени наблюдения.

Различают три вида величин, характеризующих оптическое излучение:

1) энергетические фотометрические величины  $X_e$  — величины, определяющие временное, пространственное, спектральное распределение энергии оптического излучения, количественно выражаемые в единицах энергии или мощности или в производных от них;

2) фотонные фотометрические величины  $X_p$ , количественно выражаемые в безразмерных единицах числа фотонов и производных от него.

3) редуцированные<sup>1</sup> фотометрические величины  $X_v$  — величины, характеризующие оптическое излучение по его воздействию на заданный селективный приемник. Каждая из редуцированных фотометрических величин есть интеграл от произведения спектральной плотности  $X_{e,\lambda}$  соответствующей фотометрической величины, характеризующей излучение, на относительную спектральную чувствительность  $S(\lambda)$  данного приемника:

$$X_r = K \int_0^{\infty} X_{e,\lambda} S(\lambda) d\lambda, \quad (8.1)$$

<sup>1</sup> Термин «редуцированная фотометрическая величина» установлен [27] вместо употреблявшегося ранее термина «эффективная величина».

где  $K$  — переводной множитель от единиц энергетических величин к единицам, применяемым в данной системе редуцированных величин.

В Международную систему единиц включены единицы только одного вида редуцированных величин — световых величин. Поэтому в настоящем пособии из всех редуцированных фотометрических величин будут рассмотрены только световые величины.

Для обозначения фотометрических величин разных видов установлены подстрочные индексы: обозначения энергетических величин снабжаются индексом  $e$ , обозначения фотонных величин — индексом  $p$ , обозначения световых величин — индексом  $v$ .

Допускается не использовать подстрочные индексы  $e$  и  $v$  в обозначениях величин, когда исключена возможность их различного толкования.

## § 8.2

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- Энергия излучения  $Q_e$ ,  $W$  — энергия, переносимая излучением.

Энергия излучения, как и любая другая энергия, имеет размерность  $\dim Q_e = L^2 M T^{-2}$  и выражается в джоулях ( $[Q_e] = 1 \text{ Дж}$ ).

Джоуль равен энергии излучения, эквивалентной работе 1 Дж.

- Объемная плотность энергии излучения  $U_e$  — отношение энергии излучения  $dQ_e$  к объему  $dV$ , который оно заполняет:

$$U_e = dQ_e / dV.$$

Размерность и единица объемной плотности энергии излучения:

$$\dim Q_e = L^{-1} M T^{-2}, \quad [U_e] = 1 \text{ Дж/м}^3.$$

Джоуль на кубический метр равен объемной плотности энергии излучения, при которой в объеме  $1 \text{ м}^3$  содержится энергия излучения, равная 1 Дж.

- Поток излучения  $\Phi_e$ ,  $P$  — мощность излучения, определяемая отношением энергии, переносимой



излучением, к времени переноса, значительно превышающему период электромагнитных колебаний:

$$\Phi_e = \Delta Q_e / \Delta t.$$

Размерность и единица потока излучения:

$$\dim \Phi_e = L^2 M T^{-3}, [\Phi_e] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}.$$

*Ватт* равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

В случае импульсного излучения определяется средняя мощность.

• Средняя мощность излучения  $\langle \Phi_e \rangle$ ,  $\langle P \rangle$  — физическая величина, определяемая отношением энергии, переносимой непрерывным или импульсным излучением, к времени наблюдения:

$$\langle \Phi_e \rangle = \Delta Q_e / \Delta t.$$

Поток излучения может быть также выражен соотношением

$$\Phi_e = \int \Phi_{e,\lambda} d\lambda,$$

где  $\Phi_{e,\lambda}$  — спектральная плотность потока излучения по длине волны.

• Сила излучения  $I_e$  — физическая величина, определяемая отношением потока излучения  $d\Phi_e$ , распространяющегося от источника излучения внутри малого телесного угла  $d\Omega$ , содержащего рассматриваемое направление, к этому телесному углу:

$$I_e = d\Phi_e / d\Omega.$$

Размерность и единица силы излучения:

$$\dim I_e = \frac{\dim \Phi_e}{\dim \Omega} = \frac{L^2 M T^{-3}}{1} = L^2 M T^{-3},$$

$$[I_e] = \frac{[\Phi_e]}{[\Omega]} = \frac{1 \text{ Вт}}{1 \text{ ср}} = 1 \text{ Вт/ср}.$$

*Ватт на стерадиан* равен силе излучения точечного источника, излучающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт.

Сила излучения может быть выражена также соотношением

$$I_e = \int I_\lambda d\lambda,$$

где  $I_\lambda$  — спектральная плотность силы излучения по длине волны (см. также с. 177).

• Энергетическая светимость  $M_e$  — величина, равная отношению потока  $d\Phi_e$ , исходящего от рассматриваемого малого участка поверхности, к площади  $dA$  этого участка:

$$M_e = d\Phi_e / dA.$$

Размерность и единица энергетической светимости:

$$\dim M_e = M T^{-3}, [M_e] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ватт на квадратный метр* равен энергетической светимости, при которой поверхность площадью 1 м<sup>2</sup> излучает поток излучения 1 Вт.

\* Энергетическая светимость может быть выражена также формулой

$$M_e = \int M_\lambda d\lambda,$$

где  $M_\lambda$  — спектральная плотность энергетической светимости по длине волны. Для неполяризованного излучения черного тела

$$M_\lambda = \frac{c}{4} w_\lambda; \quad M_e = \sigma T^4,$$

где  $w_\lambda$  — плотность энергии излучения в бесконечно малом интервале длин волн, деленная на значение этого интервала,

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}.$$

• Облученность  $E_e$  — физическая величина, определяемая отношением потока излучения  $d\Phi_e$ , поглощенного малым участком поверхности, содержащей рассматриваемую точку, к площади  $dA$  этого участка:

$$E_e = d\Phi_e / dA.$$

Размерность и единица облученности:

$$\dim E_e = M T^{-3}, [E_e] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ватт на квадратный метр* равен облученности, при которой поверхность площадью 1 м<sup>2</sup> поглощает поток излучения 1 Вт.

Облученность может быть также выражена соотношением

$$E_e = \int E_\lambda d\lambda,$$

где  $E_\lambda$  — спектральная плотность облученности по длине волны.

• Пространственная облученность  $E_{oe}$  — физическая величина, определяемая суммой облученностей  $dE_{i,e}$ ,





Рис. 8.1. К определению понятия «пространственная облученность»

создаваемых совокупностью пучков, содержащихся в малых телесных углах  $d\Omega$  всех направлений  $\Omega_i$  в пространстве с вершиной в рассматриваемой точке  $M$  на площадках, перпендикулярных направлениям  $\Omega_i$  и содержащих точку  $M$  (рис. 8.1):

$$E_{oe} = \int dE_{i,e} = \int L_{i,e} d\Omega, \quad (8.2)$$

где  $L_{i,e}$  — энергетическая яркость пучка в направлении  $\Omega_i$ .

Размерность и единица пространственной облученности:

$$\dim E_{oe} = \text{MT}^{-3}, \quad [E_{oe}] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

• Энергетическое освечивание  $\Theta_e$  — физическая величина, определяемая интегралом силы излучения по времени:

$$\Theta_e = \int I_e dt.$$

В случае постоянной силы излучения эта формула примет вид

$$\Theta_e = I_e \Delta t.$$

Размерность и единица энергетического освечивания:

$$\dim \Theta_e = \text{L}^2 \text{MT}^{-3} \text{T} = \text{L}^2 \text{MT}^{-2}, \quad [\Theta_e] = 1 \text{ Дж/ср.}$$

Джоуль на стерадиан равен энергетическому освечиванию, которое создает постоянная сила излучения за время 1 с.

• Энергетическая экспозиция  $H_e$  — физическая величина, определяемая интегралом облученности по времени:

$$H_e = \int E_e dt.$$

При постоянной облученности эта формула принимает вид

$$H_e = E_e \Delta t,$$

т. е. энергетическая экспозиция есть величина, равная произведению облученности на длительность облучения.

Размерность и единица энергетической экспозиции:

$$\dim H_e = \text{MT}^{-2}, \quad [H_e] = 1 \text{ Дж/м}^2.$$

Джоуль на квадратный метр равен энергетической экспозиции, при которой на поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$  падает излучение с энергией 1 Дж.

• Пространственная энергетическая экспозиция  $H_{oe}$  — физическая величина, определяемая интегралом пространственной облученности по времени

$$H_{oe} = \int E_{oe} dt.$$

В случае постоянной пространственной облученности эта формула примет вид

$$H_{oe} = E_{oe} \Delta t.$$

Размерность и единица пространственной энергетической экспозиции:

$$\dim H_{oe} = \text{MT}^{-2}, \quad [H_{oe}] = 1 \text{ Дж/м}^2.$$

Джоуль на квадратный метр равен пространственной энергетической экспозиции, при которой на поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$  падает излучение с энергией 1 Дж.

• Энергетическая яркость  $L_e$  в точке поверхности и в заданном направлении — величина, равная отношению силы излучения  $dI_e$  элемента излучающей поверхности к площади  $dA$  ортогональной проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:

$$L_e = dI_e / dA.$$

Размерность и единица энергетической яркости:

$$\dim L_e = \text{MT}^{-3}, \quad [L_e] = 1 \text{ Вт/(ср} \cdot \text{м}^2).$$

Ватт на стерадиан-квадратный метр равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  в перпендикулярном ей направлении при силе излучения 1 Вт/ср.

\* Энергетическая яркость может быть также выражена соотношением

$$L_e = \int L_\lambda d\lambda,$$

где  $L_\lambda$  — спектральная плотность энергетической яркости. Для неполяризованного излучения черного тела

$$L_\lambda = \frac{c}{4\pi} w_\lambda,$$

где  $w_\lambda$  — плотность энергии излучения в бесконечно малом интервале длин волн, деленная на значение этого интервала.



● Интегральная энергетическая яркость  $\Lambda_e$  — физическая величина, определяемая интегралом энергетической яркости по времени:

$$\Lambda_e = \int L_e dt.$$

В случае постоянной энергетической яркости эта формула примет вид

$$\Lambda_e = L_e \Delta t.$$

Размерность и единица интегральной энергетической яркости:

$$\dim \Lambda_e = \text{MT}^{-2}, [\Lambda_e] = 1 \text{ Дж}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2).$$

Джоуль на стерадиан-квадратный метр равен интегральной энергетической яркости за время 1 с при энергетической яркости, равной 1 Вт/(ср · м<sup>2</sup>).

● Спектральная плотность оптической величины — отношение среднего значения оптической величины в рассматриваемом малом спектральном интервале к ширине этого интервала.

\* 1. Обозначением спектральной плотности оптической величины служит буква, представляющая соответствующую оптическую величину, с подстрочным индексом, указывающим спектральную координату, в качестве которой могут применяться частота  $f$ , длина волны  $\lambda$ , волновое число  $\nu$ , их логарифмы или другие величины, определяющие положение монохроматического излучения в спектре. При необходимости термин уточняют, например спектральная плотность потока излучения по длине волны  $\Phi_\lambda$ ; спектральная плотность яркости по длине волны  $L_\lambda$ .

2. Спектральный интервал выражается в величинах, соответствующих выбранной спектральной координате.

3. Оптические величины, являющиеся функцией спектральной координаты (частоты, длины волны, волнового числа и т. д.), но не представляющие собой спектральную плотность, обозначают буквой, представляющей соответствующую оптическую величину, после которой ставят в скобках спектральную координату ( $f$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$  и т. д.); термин образуют путем прибавления к соответствующему термину прилагательного «спектральный», например спектральный коэффициент отражения  $\rho_\lambda$ .

4. Для величин, представляющих собой спектральную плотность, зависимость от спектральной координаты называется распределением спектральной плотности величины по данной координате, например распределение спектральной плотности потока излучения по длине волны  $\Phi_\lambda(\lambda)$ .

● Спектральная плотность энергетической светимости по длине волны  $M_{e,\lambda}$  — отношение среднего значения энергетической светимости в рассматриваемом малом спектральном интервале к ширине  $\Delta\lambda$  этого интервала:

$$M_{e,\lambda} = \frac{\langle M_e \rangle}{\Delta\lambda}.$$

Размерность и единица спектральной плотности энергетической светимости по длине волны:

$$\dim_{e,\lambda} = \frac{\dim M_e}{\dim \lambda} = \frac{\text{MT}^{-3}}{\text{L}} = \text{L}^{-1} \text{MT}^{-3},$$

$$M_{e,\lambda} = \frac{[M_e]}{[\lambda]} = \frac{1 \text{ Вт/м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{м}).$$

● Спектральная плотность энергетической светимости по частоте  $M_{e,f}$  — отношение среднего значения энергетической светимости в рассматриваемом малом спектральном интервале к ширине  $\Delta f$  этого интервала:

$$M_{e,f} = \frac{\langle M_e \rangle}{\Delta f}.$$

Размерность и единица спектральной плотности энергетической светимости по частоте:

$$\dim M_{e,f} = \frac{\text{MT}^{-3}}{\text{T}^{-1}} = \text{MT}^{-2}, [M_{e,f}] = \frac{1 \text{ Вт/м}^2}{1 \text{ с}^{-1}} = 1 \text{ Дж/м}^2.$$

Аналогично образуются спектральные плотности других энергетических фотометрических величин. Опуская процесс получения этих величин, приведем их наименования, обозначения, размерности и единицы.

● Спектральная плотность облученности по длине волны  $E_{e,\lambda}$ :

$$\dim E_{e,\lambda} = \text{L}^{-1} \text{MT}^{-3}, [E_{e,\lambda}] = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{м}).$$

● Спектральная плотность облученности по частоте  $E_{e,f}$ :

$$\dim E_{e,f} = \text{MT}^{-2}, [E_{e,f}] = 1 \text{ Дж/м}^2.$$

● Спектральная плотность силы излучения по длине волны  $I_{e,\lambda}$ :

$$\dim I_{e,\lambda} = \text{LMT}^{-3}, [I_{e,\lambda}] = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ср}).$$

● Спектральная плотность силы излучения по частоте  $I_{e,f}$ :

$$\dim I_{e,f} = \text{L}^2 \text{MT}^{-2}, [I_{e,f}] = 1 \text{ Дж/ср}.$$



- Спектральная плотность энергетической яркости по длине волны  $L_{e,\lambda}$ :

$$\dim L_{e,\lambda} = L^{-1} M T^{-3}, [L_{e,\lambda}] = 1 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}).$$

- Спектральная плотность энергетической яркости по частоте  $L_{e,f}$ :

$$\dim L_{e,f} = M T^{-2}, [L_{e,f}] = 1 \text{ Дж}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2).$$

- Постоянная Вина  $b$  — физическая величина, входящая в качестве коэффициента пропорциональности в закон смещения Вина:

$$\lambda_m = b/T,$$

где  $\lambda_m$  — длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости по длине волны  $M_{e,\lambda}^0$  черного тела при данной температуре  $T$ .

Из приведенной формулы получим

$$b = \lambda_m T.$$

Размерность и единица постоянной Вина:

$$\dim b = L \Theta, [b] = 1 \text{ м} \cdot \text{К}.$$

### § 8.3

#### СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ<sup>1</sup>

- Сила света  $I$  — основная световая величина в системе величин, на которой построена Международная система единиц. Сила света характеризует свечение источника видимого излучения в некотором направлении.

Размерность и единица силы света, как и всех остальных основных величин СИ, установлены произвольно:

$$\dim I_v = J, [I_v] = 1 \text{ кд (кандела)}.$$

Первоначально за канделу<sup>2</sup> принималась сила света стеариновой, спермацетовой или парафиновой

<sup>1</sup> Терминология и определения световых величин и других понятий, а также единицы световых величин соответствуют [16, 27, 68].

<sup>2</sup> Это наименование происходит от латинского слова *candela* — свеча. До 1970 г. в государственных стандартах СССР единица силы света именовалась свечой.

свечи определенной массы или сила света лампы накаливания и др.

В 1881 г. Международным конгрессом электриков в качестве единицы силы света была принята 1/20 силы света, излучаемой поверхностью затвердевающей платины площадью 1 см<sup>2</sup> в направлении, нормальном к поверхности. Однако в связи с трудностями осуществления платинового эталона единицы силы света в 1984 г. по постановлению Международного комитета мер и весов был практически совершен переход к новой единице, установленной с помощью платинового излучателя.

Принципиальная схема платинового излучателя показана на рис. 8.2. В расплавленную платину 1, находящуюся в керамическом тигле 2, погружена трубка 3, стенки которой, выполненные из плавного оксида тория, служат излучателем. Тигель с расплавленной платиной вставлен во внешний сосуд 4, заполненный в качестве теплоизолятора оксидом тория 5.

Для поддержания необходимой температуры (температуры затвердевания платины) внешние стенки сосуда 4 подогреваются индукционной печью (на рисунке не показана). Трубка и тигель для расплава закрыты крышкой с отверстием, диаметр которого немного меньше диаметра выходного отверстия трубки.

Выходное отверстие может быть принято за полный излучатель<sup>1</sup>.

В соответствии с решением XIII Генеральной конференции по мерам и весам (1967) единице силы света было дано определение: кандела — сила света, испускаемого с площади 1/600 000 м<sup>2</sup> сечения полного излучателя

<sup>1</sup> Полный излучатель — излучатель, изготовленный из материала, обладающего свойствами черного тела. Такими свойствами обладают платина и плавный оксид тория при температуре затвердевания платины.

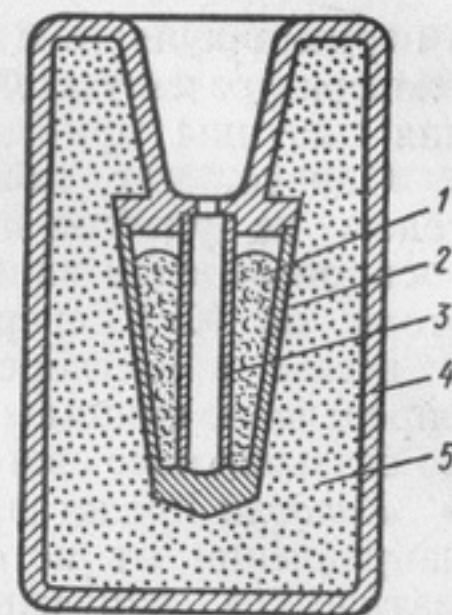


Рис. 8.2. Платиновый эталон канделы



в перпендикулярном этому сечению направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па.

Однако, как показал опыт, пользуясь черным телом не удастся повысить значительно точность воспроизведения единицы силы света — канделы. Поэтому на XVI Генеральной конференции по мерам и весам в октябре 1979 г. было принято новое определение единицы силы света — канделы, однозначно связывающее световые единицы с энергетическими.

• *Кандела* представляет собой силу света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1,683 Вт настерадиан.

\* Понятие силы света применимо для расстояний от источника, намного превышающих его линейные размеры.

Новое определение канделы позволяет воспроизводить ее без создания черного тела, что соответственно дает возможность повысить точность ее воспроизведения.

Поскольку новое определение единицы силы света в отличие от старого не устанавливает способа построения эталона канделы, каждая страна выбирает его самостоятельно.

В СССР новый эталон канделы был создан в 1983 г.<sup>1</sup>

С целью проверки одинаковости результатов фотометрических измерений, полученных в соответствии с новым определением канделы, Международным комитетом мер и весов эпизодически производится международное сличение национальных эталонов единицы силы света.

• Световой поток  $d\Phi_v$  источника силой света  $I_v$  в элементарном телесном угле  $d\Omega$  составляет

$$d\Phi_v = I_v d\Omega.$$

Размерность и единица светового потока:

$$\dim \Phi = J, [\Phi_v] = 1 \text{ кд} \cdot \text{рад (кандела-радиан)}.$$

Эта единица называется люмен.

*Люмен* равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.

• Световая энергия  $Q_v$  — величина, определяемая интегралом светового потока по времени:

$$Q_v = \int \Phi_v dt.$$

При постоянном световом потоке эта формула принимает вид

$$Q_v = \Phi_v \Delta t.$$

Размерность и единица световой энергии:

$$\dim Q_v = \text{TJ}, [Q_v] = 1 \text{ лм} \cdot \text{с}.$$

*Люмен-секунда* равна световой энергии светового потока в 1 лм, действующего в течение 1 с.

\* Световая энергия может быть определена, так же как редуцированная световая величина, по соотношению (8.1). На основе этого соотношения для световой энергии получим

$$Q_v = K_m \int_0^\infty Q_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda, \quad (8.3)$$

где  $K_m$  — переводной множитель при переходе от единиц энергетических величин к единицам световых величин,  $Q_{e,\lambda}$  — спектральная плотность энергии излучения по длине волны,  $V(\lambda)$  — относительная спектральная световая эффективность.

Решением 13 ГКМВ (1979) установлено единое для всех длин волн значение переводного множителя  $K_m = 683 \text{ лм/Вт}$ . Спектральная плотность энергии излучения по длине волны  $V(\lambda)$  — отношение энергии излучения, взятой в бесконечно малом спектральном интервале  $d\lambda$ , содержащем данную длину волны  $\lambda$ , к ширине этого интервала:

$$V(\lambda) = dQ_{e,\lambda} / d\lambda.$$

• Яркость  $L_v$  в точке поверхности и в данном направлении — отношение силы света  $dI_v$  элемента поверхности к площади  $dA$  ортогональной проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную данному направлению [39]:

$$L_v = dI_v / dA.$$

Размерность и единица яркости:

$$\dim L_v = \text{L}^{-2} \text{J}, [L_v] = 1 \text{ кд/м}^2.$$

*Кандела на квадратный метр*<sup>1</sup> равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м<sup>2</sup> при силе света 1 кд.

<sup>1</sup> Ранее эта единица яркости называлась нит.

<sup>1</sup> Ввиду сложности здесь не приводится описание этого эталона. Интересующимся рекомендуем источники: 1) Измерительная техника. 1984. № 2. С. 6, 2) Светотехника. 1986. № 5. С. 19.



- Светимость  $M_v$  в точке поверхности — отношение светового потока  $d\Phi_v$ , исходящего от элемента поверхности, к площади  $dA$  этого элемента:

$$M_v = d\Phi_v / dA.$$

Размерность и единица светимости:

$$\dim M_v = L^{-2}J, [M_v] = 1 \text{ лм/м}^2.$$

Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ , испускающей световой поток 1 лм.

- Освещенность  $E_v$  в точке поверхности — величина, равная отношению светового потока  $d\Phi_v$ , падающего на элемент поверхности, к площади  $dA$  этого элемента:

$$E_v = d\Phi_v / dA.$$

Размерность и единица освещенности:

$$\dim E_v = L^{-2}J, [E_v] = 1 \text{ лм/м}^2.$$

Эта единица освещенности называется люкс (лк).

Люкс равен освещенности поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  при падающем на нее световом потоке 1 лм.

- Пространственная освещенность  $E_{ov}$  — физическая величина, определяемая суммой освещенностей  $dE_{i,v}$ , создаваемых совокупностью пучков, содержащихся в малых телесных углах всех направлений  $\Omega_i$  в пространстве с вершиной в некоторой точке  $M$  на площадках, перпендикулярных направлениям  $\Omega_i$  и содержащих эту точку (см. рис. 8.1):

$$E_{ov} = \int dE_{n,v} = \int L_v d\Omega, \quad (8.4)$$

где  $L_v$  — яркость пучка в направлении  $\bar{\Omega}_i$ .

Размерность и единица пространственной освещенности:

$$\dim E_{ov} = L^{-2}J, [E_{ov}] = 1 \text{ лк}.$$

- Освечивание  $\Theta_v$  — физическая величина, определяемая интегралом силы света по времени:

$$\Theta_v = \int I_v dt.$$

В случае постоянства силы света эта формула примет вид

$$\Theta_v = I_v \Delta t.$$

Размерность и единица освечивания:

$$\dim \Theta_v = TJ, [\Theta_v] = 1 \text{ кд} \cdot \text{с}.$$

- Световая экспозиция (экспозиция)  $H_v$  — физическая величина, определяемая интегралом освещенности по времени:

$$H_v = \int E_v dt.$$

Размерность и единица экспозиции:

$$\dim H_v = L^{-2}TJ, [H_v] = 1 \text{ лк} \cdot \text{с}.$$

Люкс-секунда равна световой экспозиции, создаваемой за время 1 с при освещенности 1 лк.

\* Световая экспозиция может быть также определена как отношение световой энергии  $dQ_v$ , падающей на рассматриваемый участок поверхности, к площади  $dA$  этого участка:

$$H_v = dQ_v / dA.$$

- Пространственная световая экспозиция  $H_{ov}$  — физическая величина, определяемая интегралом пространственной освещенности по времени:

$$H_{ov} = \int E_{ov} dt.$$

Размерность и единица пространственной световой экспозиции:

$$\dim H_{ov} = L^{-2}TJ, [H_{ov}] = 1 \text{ лк} \cdot \text{с}.$$

- Интегральная яркость  $\Lambda_v$  — физическая величина, определяемая интегралом яркости по времени:

$$\Lambda_v = \int L_v dt. \quad (8.5)$$

Размерность и единица интегральной яркости:

$$\dim \Lambda_v = L^{-2}TJ, [\Lambda_v] = 1 \text{ кд} \cdot \text{с/м}^2.$$

- Объемная плотность световой энергии  $U_v$  — физическая величина, определяемая отношением световой энергии  $dQ_v$  к малому объему  $dV$ , который заполняется светом, и равная

$$U_v = dQ_v / dV.$$

Размерность и единица объемной плотности световой энергии:

$$\dim U_v = L^{-3}TJ, [U_v] = 1 \text{ лм} \cdot \text{с/м}^3.$$

Люмен-секунда на кубический метр равен объемной плотности световой энергии, при которой



в пространстве, заполненном светом, объемом  $1 \text{ м}^3$  световая энергия равна  $1 \text{ лм} \cdot \text{с}$ .

• Объемная плотность силы света  $I_{ov}$  — физическая величина, определяемая отношением силы света  $dI_v(\varphi, \theta)$  малого объема  $dV$  светорассеивающей или самосвещающей среды, содержащего рассматриваемую точку, в некотором направлении, определяемом углами  $\varphi$  и  $\theta$ , к объему  $dV$ :

$$I_{ov} = \frac{dI_v(\varphi, \theta)}{dV}.$$

Размерность и единица объемной плотности силы света:

$$\dim I_{ov} = L^{-3} J, [I_{ov}] = 1 \text{ кд/м}^3.$$

• Эквивалентная яркость  $L_{eq}$  — яркость поля сравнения, имеющего относительный спектральный состав излучения черного тела при температуре  $2042 \text{ К}$ , которое в определенных условиях визуального фотометрирования, учитывающего состояние адаптации глаза к дневным, ночным или промежуточным яркостям, находится в фотометрическом равновесии с измеряемым полем.

Единица эквивалентной яркости такая же, как и единица яркости:

$$[L_{eq}] = 1 \text{ кд/м}^2.$$

## § 8.4

### ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА<sup>1</sup>

#### Общие понятия

• Естественный свет (неполяризованный свет) — оптическое излучение с быстро и беспорядочно изменяющимися направлениями напряженности электромагнитного поля, причем все направления колебаний, перпендикулярные световым лучам, равноправны.

Раскаленные тела, светящиеся газы испускают свет, близкий к естественному, но все же обычно в небольшой степени поляризованный. Весьма близок к естественному свету прямой солнечный свет.

<sup>1</sup> Терминология и определения величин и других понятий данного параграфа соответствуют [12, 66, 72].

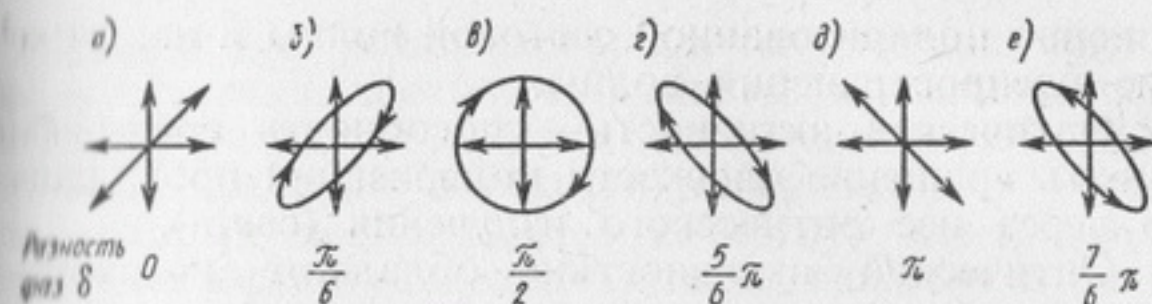


Рис. 8.3. К понятию «эллипс поляризации»

• Поляризация света — упорядочение в ориентации векторов напряженностей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей световой волны в плоскости, перпендикулярной световому лучу.

\* Поскольку векторы  $E$  и  $H$  электромагнитной волны перпендикулярны один другому, для полного описания состояний поляризации светового пучка требуется знать поведение лишь одного из них. Обычно выбирают для этой цели вектор  $E$ .

• Полностью поляризованный свет — свет, у которого две взаимно перпендикулярные компоненты (проекции)  $E_x$  и  $E_y$  электрического вектора  $E$  совершают колебания с постоянной по времени разностью фаз  $\delta$ .

Состояние поляризации света изображается с помощью эллипса поляризации.

• Эллипс поляризации — проекция траектории, которую описывает конец вектора  $E$  на плоскость, перпендикулярную лучу (рис. 8.3). В общем случае проекционная картина имеет вид эллипса с правым или левым направлением вращения вектора  $E$  во времени, но может вырождаться в окружность и прямую. В связи с этим различают поляризации эллиптическую, круговую или циркулярную и линейную.

• Эллиптическая поляризация света — поляризация, при которой проекция траектории, описываемой концом вектора  $E$  на плоскость, перпендикулярную лучу, имеет вид эллипса (рис. 8.3, б, г, е).

• Круговая (циркулярная) поляризация — поляризация, при которой проекция траектории, описываемой концом вектора  $E$  на плоскость, перпендикулярную лучу, имеет вид окружности (рис. 8.3, в).

• Линейная поляризация света — поляризация, при которой проекция траектории, описываемой концом вектора  $E$  на плоскость, перпендикулярную лучу, имеет вид отрезка прямой (рис. 8.3, а, д).

• Плоскость поляризации — плоскость, проходящая через направление колебаний электрического вектора



линейно поляризованной световой волны и направление распространения волны.

- Оптическая активность — способность среды вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через нее оптического излучения (света).

Оптической активностью обладают некоторые чистые жидкости (например, скипидар), а также растворы и пары многих органических веществ (например, сахара).

- Круговое двойное преломление (круговое двулучепреломление) — явление, заключающееся в возникновении двух составляющих оптического излучения с правой и левой круговой поляризацией при распространении их в этой среде.

- Круговой дихроизм — свойство среды, заключающееся в различии коэффициентов поглощения для оптических излучений с правой и левой круговой поляризацией при распространении их в этой среде.

- Оптическая анизотропия — различие оптических свойств среды в зависимости от направления распространения в ней оптического излучения (света) и его поляризации. Оптическая анизотропия проявляется в двойном лучепреломлении, дихроизме, изменении эллиптичности поляризации света и во вращении плоскости поляризации, происходящем в оптически активных веществах.

### Величины, характеризующие поляризацию света

- Азимут линейно поляризованного излучения  $\alpha$  — угол между произвольно выбранной фиксированной линией на плоскости, перпендикулярной направлению распространения оптического излучения, и плоскостью поляризации излучения.

\* Угол отсчитывается против часовой стрелки при наблюдении навстречу направлению распространения излучения.

- Угол Брюстера  $\varepsilon_B$  — угол падения светового луча, при котором отраженный от диэлектрика свет полностью поляризован.

- Степень поляризации  $P$  — отношение интенсивности поляризованной составляющей оптического излучения к полной его интенсивности:

$$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  — максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам электрического вектора  $E$ .

- Угол вращения плоскости поляризации  $\varphi$  — угол, на который поворачивается плоскость поляризации при взаимодействии линейно поляризованного оптического излучения с веществом.

- Удельное вращение вещества  $\alpha$  — величина, равная отношению угла  $\varphi$ , на который повернется плоскость поляризации при прохождении светом оптически активного вещества, к длине  $l$  пройденного пути:

$$\alpha = \varphi / l.$$

Размерность и единица удельного вращения вещества:

$$\dim \alpha = L^{-1}, [\alpha] = 1 \text{ рад/л м} = 1 \text{ рад/м}.$$

*Радан на метр* равен удельному вращению вещества, при прохождении в котором оптического излучения плоскость поляризации последнего поворачивается на 1 рад на пути 1 м.

- Относительное удельное вращение вещества  $\alpha_{\text{уд}}$  — отношение удельного вращения вещества  $\alpha$  к плотности этого вещества:

$$\alpha_{\text{уд}} = \alpha / \rho.$$

Размерность и единица относительного удельного вращения вещества:

$$\dim \alpha_{\text{уд}} = \frac{L^{-1}}{L^{-3} M} = L^2 M,$$

$$[\alpha_{\text{уд}}] = \frac{1 \text{ рад/м}}{1 \text{ кг/м}^3} = 1 \text{ рад} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}.$$

*Радан-квадратный метр на килограмм* равен относительному удельному вращению вещества с удельным вращением 1 рад/м и плотностью 1 кг/м<sup>3</sup>.

- Удельное вращение раствора  $\alpha_{\text{уд}}$  — величина, равная отношению угла, на который повернется плоскость поляризации оптического излучения определенной длины волны при прохождении им пути единичной длины в растворе, к концентрации раствора:

$$\alpha_{\text{уд}} = \frac{\varphi}{lC}.$$



Размерность и единица удельного вращения раствора:

$$\dim \alpha_{\text{уд}} = \frac{1}{LL^{-3}M} = L^2M^{-1},$$

$$[\alpha_{\text{уд}}] = \frac{1 \text{ рад}}{1 \text{ м} \cdot 1 \text{ кг/м}^3} = 1 \text{ рад} \cdot \text{м}^2/\text{кг}.$$

Радан-квадратный метр на килограмм равен удельному вращению раствора, при прохождении в котором оптического излучения плоскость поляризации последнего повернется на 1 рад на пути 1 м при концентрации раствора 1 кг/м<sup>3</sup>.

● Молярное вращение раствора  $\alpha_m$  — отношение угла  $\varphi$ , на который поворачивается плоскость поляризации оптического излучения определенной длины волны при прохождении им пути единичной длины волны в растворе вещества, к молярной концентрации  $m$  раствора:

$$\alpha_m = \frac{\varphi}{lm}.$$

Размерность и единица молярного вращения раствора:

$$\dim \alpha_m = \frac{1}{LL^{-3}N} = L^2N^{-1}, \quad [\alpha_m] = \text{рад} \cdot \text{м}^2/\text{моль}.$$

Радан-квадратный метр на моль равен молярному вращению раствора, при прохождении в котором оптического излучения плоскость поляризации последнего повернется на 1 рад на пути 1 м.

● Показатель преломления обыкновенного луча  $n_o$  — отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к скорости обыкновенного луча в анизотропной среде.

● Главный показатель преломления необыкновенного луча  $n_e$  — отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости необыкновенного луча в анизотропной среде в направлении, перпендикулярном оптической оси, в случае одноосной анизотропии или в направлении, перпендикулярном биссектрисе угла между оптическими осями, в случае двухосной анизотропии.

● Показатель двулучепреломления  $b$  — разность между главным показателем преломления необыкновенного луча в анизотропной среде и показателем преломления обыкновенного луча в той же среде.

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ<sup>1</sup>

● Тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии. Тепловое излучение имеет сплошной спектр. Положение максимума спектральной плотности энергетической светимости теплового излучения зависит от температуры вещества. С ее повышением возрастает общая энергия испускаемого теплового излучения, а максимум перемещается в область малых длин волн. Последнее всегда справедливо только для черного тела. Для других тел может быть и не так.

● Черное тело — тело, которое полностью поглощает все падающие на него излучения независимо от направления падающего излучения, его спектрального состава, ничего не отражая и не пропуская через себя.

\* Черное тело при данной температуре характеризуется наибольшей энергией излучения для всех частот по сравнению с излучением других (нечерных) тел.

● Серое тело — тело, коэффициент поглощения которого меньше 1 и не зависит от длины волны (частоты) падающего излучения.

● Степень черноты — отношение потока собственного излучения тела к потоку черного излучения при той же температуре.

\* Различают «спектральную степень черноты», соответствующую данной длине волны (данной частоте), и «интегральную степень черноты», соответствующую всему спектру частот или конечному его интервалу.

● Коэффициент теплового излучения  $\varepsilon$  — величина, равная отношению энергетической светимости  $M_e$  теплового излучателя к энергетической светимости  $M_e^0$  черного тела при той же температуре:

$$\varepsilon = M_e / M_e^0.$$

Отсюда следует, что коэффициент теплового излучения как величина, равная отношению однород-

<sup>1</sup> Терминология, определения величин и других понятий, а также обозначения величин в данном параграфе соответствуют [12].



ных величин, есть величина безразмерная и выражается в безразмерных единицах.

• Коэффициент направленного теплового излучения  $\varepsilon(\theta, \varphi)$  — отношение энергетической яркости теплового излучателя в данном направлении к энергетической яркости черного тела при той же температуре.

Коэффициент направленного теплового излучения — величина безразмерная.

• Радиационная температура  $T_M$ ,  $T_R$  — температура черного тела, при которой его энергетическая светимость равна энергетической светимости рассматриваемого теплового излучателя ( $\dim T_M = \Theta$ ,  $[T_M] = 1 \text{ K}$ )<sup>1</sup>.

• Яркостная температура  $T_L$ ,  $T_S$  — температура черного тела, для которой для данной длины волны (частоты, волнового числа) оно имеет ту же спектральную плотность энергетической яркости, что и рассматриваемый тепловой излучатель ( $\dim T_L = \Theta$ ,  $[T_L] = 1 \text{ K}$ ).

• Цветовая температура  $T_C$  — температура черного тела, при которой его излучение имеет ту же цветность, что и рассматриваемое излучение ( $\dim T_C = \Theta$ ,  $[T_C] = 1 \text{ K}$ ).

## § 8.6

### ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЩЕСТВ, ТЕЛ, ПРОЦЕССОВ<sup>2</sup>

• Коэффициент пропускания  $\tau$ ,  $T$  — величина, определяемая отношением прошедшего потока излучения к падающему потоку излучения:

$$\tau = \frac{\Phi_{e, \text{пр}}}{\Phi_{e, \text{пад}}}$$

Из этой формулы следует, что коэффициент пропускания как величина, равная отношению двух однородных величин, является безразмерной и выражается в безразмерных единицах<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Здесь и далее в скобках указаны размерность и единица величины.

<sup>2</sup> Терминология, определения величин и других понятий, а также обозначения величин в данном параграфе соответствуют [12].

<sup>3</sup> Это замечание относится и к другим величинам подобного рода.

\* В определениях всех коэффициентов и показателей термин «поток излучения» допускается заменять термином «энергия излучения». При замене термина «поток излучения» на термины «световой поток» или «световая энергия» к термину «коэффициент» или «показатель» добавляется прилагательное «световой».

• Коэффициент направленного пропускания  $\tau_r$ ,  $T_r$  — величина, определяемая отношением потока излучения, прошедшего без рассеяния, к падающему потоку излучения.

• Коэффициент диффузного пропускания  $\tau_d$ ,  $T_d$  — величина, определяемая отношением потока излучения, прошедшего и рассеянного без заметного преломления и направленного пропускания, к падающему потоку излучения.

\* При наличии смешанного пропускания коэффициент пропускания  $\tau$  складывается из коэффициентов направленного  $\tau_r$  и диффузного  $\tau_d$  пропусканий:

$$\tau = \tau_r + \tau_d$$

• Коэффициент внутреннего пропускания  $\tau_i$ ,  $T_i$  — величина, определяемая отношением потока излучения, достигшего выходной поверхности однородной нерассеивающей пластины, к потоку излучения, прошедшего через ее входную поверхность.

• Коэффициент отражения  $\rho$ ,  $R$  — величина, определяемая отношением отраженного потока излучения к падающему потоку излучения.

• Коэффициент зеркального отражения  $\rho_r$ ,  $R_r$  — величина, определяемая отношением зеркально отраженного потока излучения к падающему потоку излучения.

• Коэффициент диффузного отражения  $\rho_d$ ,  $R_d$  — величина, определяемая отношением диффузно отраженного потока излучения к падающему потоку излучения.

\* При наличии смешанного отражения коэффициент отражения  $\rho$  складывается из коэффициентов зеркального  $\rho_r$  и диффузного  $\rho_d$  отражений:

$$\rho = \rho_r + \rho_d$$

• Коэффициент поглощения  $\alpha$  — величина, определяемая отношением потока излучения, поглощенного средой, к падающему потоку излучения.

• Коэффициент внутреннего поглощения  $\alpha_i$  — величина, определяемая отношением потока излучения, поглощенного средой, расположенной между входной и выходной поверхностями однородной нерассеиваю-



щей пластины, к потоку излучения, прошедшему через ее входную поверхность.

- Коэффициент рассеяния  $\sigma$  — величина, определяемая отношением рассеянного потока излучения к падающему потоку излучения.

- Показатель рассеяния  $r$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз в результате рассеяния в среде ( $\dim r = L^{-1}$ ,  $[r] = 1 \text{ м}^{-1}$ )<sup>1</sup>.

- Натуральный показатель рассеяния  $r'$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в  $e$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов) в результате рассеяния в среде ( $\dim r' = L^{-1}$ ,  $[r'] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).

- Показатель направленного рассеяния  $r(\theta, \varphi)$  — величина, равная отношению объемной плотности силы излучения, рассеиваемого в направлении, составляющем углы  $\theta$  и  $\varphi$  с направлением пучка излучения, к энергетической освещенности плоскости, перпендикулярной пучку излучения ( $\dim r(\theta, \varphi) = L^{-1}$ ,  $[r(\theta, \varphi)] = 1 \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ).

- Показатель ослабления  $\mu$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз в результате совместного действия поглощения и рассеяния в среде ( $\dim \mu = L^{-1}$ ,  $[\mu] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).

- Натуральный показатель ослабления  $\mu'$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в  $e$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов) в результате совместного действия поглощения и рассеяния в среде ( $\dim \mu' = L^{-1}$ ,  $[\mu'] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).

- Коэффициент пропускания  $\tau$  — величина, равная отношению потока излучения, прошедшего сквозь тело, к потоку излучения, упавшему на него. Коэффициент пропускания — величина безразмерная.

- Оптическая плотность  $D$  — десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания:

$$\alpha = \lg \frac{1}{\tau}.$$

<sup>1</sup> Здесь и далее в скобках указаны размерность и единица величины.

- Показатель преломления  $n$  — отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости излучения в данной среде.

- Главный показатель поглощения  $\kappa$  — величина, характеризующая уменьшение интенсивности излучения в веществе в результате поглощения.

\* Величины  $n$  и  $\kappa$  называются оптическими постоянными и являются составляющими комплексного показателя преломления  $\hat{n}$ :

$$\hat{n} = n - i\kappa.$$

- Показатель поглощения  $a$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз в результате поглощения в среде ( $\dim a = L^{-1}$ ,  $[a] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).

- Натуральный показатель поглощения  $a'$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в  $e$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов) в результате поглощения в среде.

\* Натуральный показатель поглощения  $a'$  и главный показатель поглощения  $\kappa$  находятся в соотношении

$$a' = 4\pi\kappa.$$

- Молярный показатель поглощения  $\epsilon$ ,  $k$  — отношение показателя поглощения исследуемого вещества к его молярной концентрации ( $\dim \epsilon = L^2 N^{-1}$ ,  $[\epsilon] = 1 \text{ м}^2/\text{моль}$ ).

- Дисперсия показателя преломления  $d_\lambda$ ,  $d_f$ ,  $d_\nu$  — частная производная от показателя преломления по длине волны, частоте или волновому числу ( $\dim d_\lambda = \dim d_f = \dim d_\nu = L^{-1}$ ,  $[d_\lambda] = [d_f] = [d_\nu] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).

- Оптическая длина пути  $s$  — сумма произведений расстояний, проходимых монохроматическим излучением в различных средах, на соответствующие показатели преломления ( $\dim s = L$ ,  $[s] = 1 \text{ м}$ ).

- Оптическая разность хода  $\Delta$  — разность оптических длин пути двух пучков излучений ( $\dim \Delta = L$ ,  $[\Delta] = 1 \text{ м}$ ).

- Коэффициент энергетической яркости  $\beta$  — отношение энергетической яркости облученной поверхности к энергетической яркости идеального рассеивателя, находящегося в тех же условиях облучения.

- Коэффициент яркости  $\beta_v$  — отношение яркости освещенной поверхности к яркости идеального рассеивания, находящегося в тех же условиях освещения.

<sup>1</sup> Оптическую длину пути часто определяют как отношение геометрической длины пути к длине волны в данной среде.



- Приведенная разность населенностей  $\Delta N$  — разность отношений числа частиц  $N_i$  и  $N_k$  в единице объема, находящихся на уровнях  $i$  и  $k$ , к статистическим весам  $g_1$  и  $g_2$  этих уровней:

$$\Delta N = \frac{N_i}{g_i} - \frac{N_k}{g_k}.$$

- \* 1. Статистический вес  $g$  — число различных квантовых состояний с данной энергией.  
 2. Уровень  $i$  ниже уровня  $k$ .  
 3. При термодинамическом равновесии  $\Delta N > 0$ . Случай с  $\Delta N < 0$  соответствует инверсии населенностей (инверсная система).

- Показатель вынужденного испускания  $f$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок в веществе с  $\Delta N < 0$  без рассеяния и поглощения, усиливается в 10 раз ( $\dim f = L^{-1}$ ,  $[f] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).
- Натуральный показатель вынужденного испускания  $f'$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок в веществе с  $\Delta N < 0$  без рассеяния и поглощения, усиливается в  $e$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов) ( $\dim f' = L^{-1}$ ,  $[f'] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).
- Показатель усиления  $g$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок в веществе с  $\Delta N < 0$ , усиливается в 10 раз в результате совместного действия поглощения, усиления и рассеяния в веществе ( $\dim g = L^{-1}$ ,  $[g] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).
- Натуральный показатель усиления  $g'$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок в веществе с  $\Delta N < 0$ , усиливается в  $e$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов) в результате совместного действия поглощения, усиления и рассеяния в веществе ( $\dim g' = L^{-1}$ ,  $[g'] = 1 \text{ м}^{-1}$ ).
- Коэффициент Эйнштейна для поглощения  $B_{ij}$  — коэффициент пропорциональности между вероятностью вынужденного оптического перехода атома (иона, молекулы) из состояния  $i$  в состояние  $j$ , сопровождающегося поглощением энергии, и спектральной объемной плотностью энергии излучения, вынуждающего переход ( $\dim B_{ij} = \text{ЛМ}^{-1}$ ,  $[B_{ij}] = 1 \text{ м}^3/(\text{Дж} \cdot \text{с}^2)$ ).

- Коэффициент Эйнштейна для вынужденного испускания  $B_{ji}$  — коэффициент пропорциональности между вероятностью вынужденного оптического перехода атома (иона, молекулы) из состояния  $j$  в состояние  $i$ , сопровождающегося испусканием энергии, и спектральной объемной плотностью излучения, вынуждающего переход ( $\dim B_{ji} = \text{ЛМ}^{-1}$ ,  $[B_{ji}] = 1 \text{ м}^3/(\text{Дж} \cdot \text{с}^2)$ ).
- Вероятность спонтанного испускания  $A_j$  — отношение среднего числа самопроизвольных переходов атома (иона, молекулы) с излучением из возбужденного состояния  $j$  к времени, рассчитанное на один возбужденный атом (ион, молекулу) ( $\dim A_j = T^{-1}$ ,  $[A_j] = 1 \text{ с}^{-1}$ ).
- Вероятность поглощения  $a_{ij}$  — отношение среднего числа вынужденных переходов атома (иона, молекулы) с поглощением из состояния  $i$  в состояние  $j$  к времени, рассчитанное на один атом (ион, молекулу) ( $\dim a_{ij} = T^{-1}$ ,  $[a_{ij}] = 1 \text{ с}^{-1}$ ).
- Вероятность вынужденного испускания  $s_{ji}$  — отношение среднего числа вынужденных переходов атома (иона, молекулы) с излучением из состояния  $j$  в состояние  $i$  к времени, рассчитанное на один возбужденный атом (ион, молекулу) ( $\dim s_{ji} = T^{-1}$ ,  $[s_{ji}] = 1 \text{ с}^{-1}$ ).
- Вероятность перехода без излучения  $d_{ij}$  — отношение среднего числа переходов атома (иона, молекулы) между состояниями  $i$  и  $j$ , не сопровождающихся поглощением или излучением, к времени, рассчитанное на один атом (ион, молекулу) ( $\dim d_{ij} = T^{-1}$ ,  $[d_{ij}] = 1 \text{ с}^{-1}$ ).
- Длительность возбужденного состояния  $\tau_i$  — величина, обратная сумме вероятностей всех возможных переходов атома (иона, молекулы) из возбужденного состояния  $i$  в любое другое состояние ( $\dim \tau_i = T$ ,  $[\tau_i] = 1 \text{ с}$ ).
- Естественная длительность возбужденного состояния  $\tau_{0i}$  — величина, обратная сумме вероятностей спонтанных переходов атома (иона, молекулы) с излучением из возбужденного состояния  $i$  в любое другое состояние ( $\dim \tau_{0i} = T$ ,  $[\tau_{0i}] = 1 \text{ с}$ ).
- Квантовый выход фотопроцесса  $\eta$  — отношение числа актов фотопроцесса к числу актов оптического возбуждения (одно- или многоквантового) системы.



## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Геометрическая или лучевая оптика — раздел оптики, в котором законы распространения оптического излучения изучаются на основе представлений о световых лучах. Под световым лучом понимается линия, вдоль которой распространяется энергия оптического излучения.

Геометрическую оптику можно рассматривать как раздел оптики, в котором пренебрегают конечностью длины волны. Если исходить из того, что длина волны стремится к нулю ( $\lambda \rightarrow 0$ ), то законы геометрической оптики можно получить из уравнений Максвелла.

Общие понятия<sup>1</sup>

- Оптическая система — совокупность оптических деталей (линз, призм, зеркал и т. п.), скомбинированных между собой определенным образом для получения оптических изображений или для преобразования светового потока, идущего от источника света.
- Оптическое изображение — картина, полученная в результате прохождения через оптическую систему пучков, распространяющихся от объекта, и воспроизводящая его контуры и детали.
- Аберрация оптических систем — искажения, погрешности изображений, формируемых оптическими системами. Аберрации оптических систем проявляются в том, что оптические изображения не вполне отчетливы, не точно соответствуют объектам или оказываются окрашенными.
- Сферическая аберрация — недостаток изображения, при котором испущенные одной точкой объекта световые лучи, прошедшие вблизи оптической оси системы, и лучи, прошедшие через отдаленные от оси части системы, не собираются в одну точку.
- Астигматизм — одна из аберраций оптических систем. Проявляется в том, что сферическая волновая поверхность при прохождении через оптические системы может деформироваться и тогда изображение

<sup>1</sup> Терминология, определения величин и других понятий, обозначения величин и их единицы соответствуют [11].

точки, не лежащей на главной оптической оси системы, представляет уже не точку, а две взаимно перпендикулярные линии, расположенные в разных плоскостях на некотором расстоянии друг от друга. Изображение точки в промежуточных между этими плоскостями сечениях имеет форму эллипсов, одно из них — форму окружности.

- Кома — аберрация, возникающая при косом прохождении световых лучей через оптическую систему.
- Хроматическая аберрация — аберрация, связанная с зависимостью показателя преломления оптических сред от длины волны света.
- Оптическая ось — общая ось вращения поверхностей, составляющих центрированную оптическую систему (на рис. 8.4 и 8.5 прямая  $AA'$  — оптическая ось).
- Осевая точка  $A$  предмета ( $A'$  изображения) — точка пересечения плоскости предмета (изображения) с оптической осью.
- Сопряженные точки — две точки, которые по отношению к оптической системе являются объектом  $A$  и его изображением  $A'$  (на рис. 8.4 и 8.5 точки  $A$  и  $A'$  — сопряженные точки). Вследствие обратимости световых лучей объект и изображение могут меняться местами.

Вследствие обратимости световых лучей объект и изображение могут меняться местами.

\* Понятие «сопряженные точки»

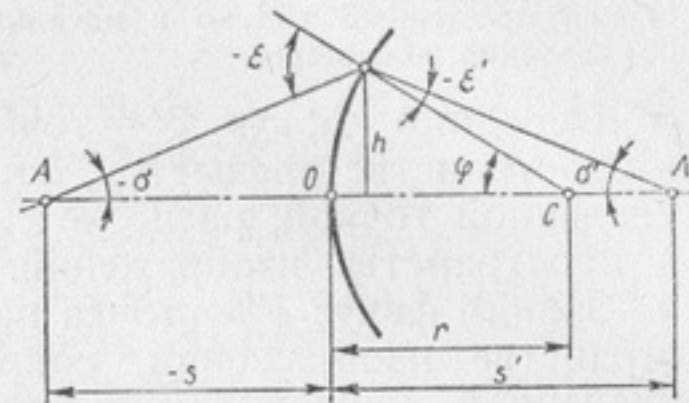


Рис. 8.4. Пространство предметов и пространство изображений сферической преломляющей (отражающей) поверхности

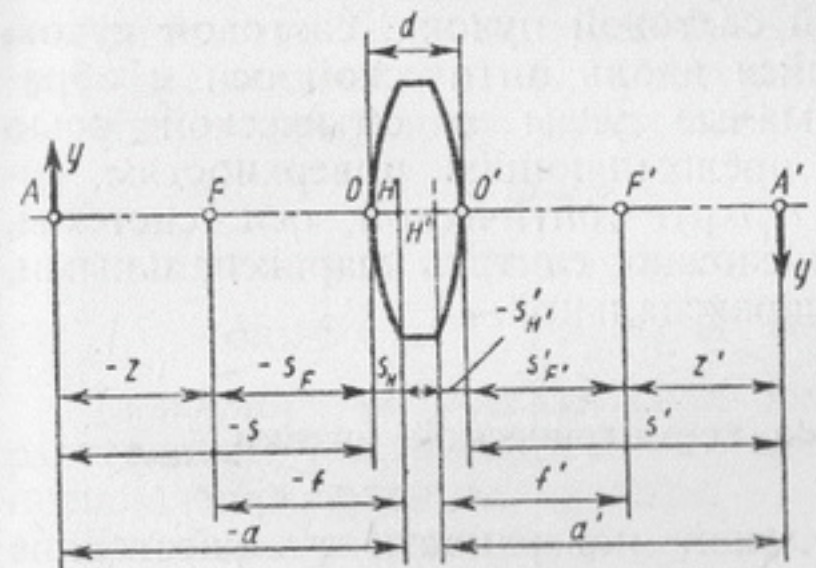


Рис. 8.5. Пространство предметов и пространство изображений двояковыпуклой линзы



строго применимо только к идеальной оптической системе, где нет явления аберрации.

- Передний фокус  $F$  — точка на оптической оси в пространстве предметов, сопряженная с бесконечно удаленной точкой, расположенной на оптической оси в пространстве изображений.
- Задний фокус  $F'$  — точка на оптической оси в пространстве изображений, сопряженная с бесконечно удаленной точкой, расположенной на оптической оси в пространстве предметов.
- Передняя (задняя) фокальная плоскость — плоскость, перпендикулярная оптической оси и проходящая через передний (задний) фокус.
- Пространство предметов — совокупность точек, изображаемых оптической системой.
- Пространство изображений — совокупность изображений точек пространства предметов.
- Вершина  $O$  преломляющей ( $O'$  — отражающей) поверхности — точка пересечения преломляющей (отражающей) поверхности с оптической осью.
- Передняя главная плоскость — плоскость в пространстве предметов, сопряженная с плоскостью в пространстве изображений, для которой линейное увеличение (см. с. 199) равно 1.
- Задняя главная плоскость — плоскость, сопряженная с плоскостью в пространстве предметов, для которой линейное увеличение равно +1.
- Передняя (задняя) главная точка  $H$  ( $H'$ ) — точка пересечения передней (задней) главной плоскости с оптической осью (рис. 8.4).
- Параксиальный световой пучок — световой пучок, распространяющийся вдоль оптической оси и образующий очень малые углы с оптической осью и нормалью к преломляющим поверхностям системы. Область вокруг оптической оси системы, в которой пучки можно считать параксиальными, тоже считается параксиальной.

### Величины геометрической оптики

- Радиус сферической поверхности  $r$  — расстояние от вершины преломляющей или отражающей поверхности до центра кривизны сферической поверхности (здесь и далее см. рис. 8.3 и 8.4).

- Переднее фокусное расстояние  $f$  — расстояние от передней главной точки до переднего фокуса.
- Заднее фокусное расстояние  $f'$  — расстояние от задней главной точки до заднего фокуса.
- Передний фокальный отрезок  $s_F$  — расстояние от вершины передней поверхности до переднего фокуса  $F$ .
- Задний фокальный отрезок  $s_{F'}$  — расстояние от вершины задней поверхности до заднего фокуса  $F'$ .
- Передний отрезок  $s$  — расстояние от вершины преломляющей или отражающей поверхности до точки пересечения падающего луча с оптической осью.
- Задний отрезок  $s'$  — расстояние от вершины преломляющей или отражающей поверхности до точки пересечения преломленного или отраженного луча с оптической осью.
- Угол падения  $\varepsilon$  — угол между световым лучом, падающим на преломляющую или отражающую поверхность, и нормалью к поверхности в точке падения.
- Угол преломления (отражения)  $\varepsilon'$  — угол между преломленным (отраженным) лучом и нормалью к поверхности в точке преломления (отражения).
- \* Углы падения, отражения и преломления отсчитываются от нормали.
- Преломляющий угол  $\theta$  — угол между двумя непараллельными преломляющими плоскостями призмы или клина.
- \* Угол измеряют в плоскости, перпендикулярной ребру двугранного угла между непараллельными преломляющими поверхностями.
- Оптическая сила системы  $\Phi$  — отношение показателя преломления  $n'$  в пространстве изображений к заднему фокусному расстоянию  $f'$  системы:

$$\Phi = n' / f'.$$

Размерность и единица оптической силы системы:

$$\dim \Phi = L^{-1}, [\Phi] = 1 \text{ м}^{-1} = 1 \text{ дптр}.$$

*Диоптрия* — оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м, помещенной в среду с показателем преломления, равным единице.

- Линейное увеличение  $\beta$  — увеличение в сопряженных плоскостях, перпендикулярных оптической оси, определяемое отношением размера параксиального изображения к размеру предмета.



- Угловое увеличение  $\gamma$  — увеличение в сопряженных точках на оптической оси, определяемое отношением углов параксиальных лучей с оптической осью в пространстве изображений и пространстве предметов:

$$\gamma = \lim \frac{\sigma'}{\sigma}.$$

- Видимое увеличение  $\Gamma$  — отношение тангенса угла, под которым наблюдается параксиальное изображение, к тангенсу угла, под которым наблюдается предмет невооруженным глазом.

Видимое увеличение микроскопа (лупы, окуляра)

$$\Gamma = \frac{250}{f'},$$

где  $f'$  — заднее фокусное расстояние оптической системы, мм.

\* Число 250 в числителе формулы означает числовое значение расстояния лучшего видения для нормального глаза, выраженное в миллиметрах.

- Видимое увеличение телескопической системы  $\Gamma_r$  — угловое увеличение для параксиальных лучей, проходящих через осевые точки входного и выходного зрачков:

$$\Gamma_r = \frac{\beta'}{\beta}.$$

## Глава 9

### ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА<sup>1</sup>

#### § 9.1

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- Вакуум — состояние среды, абсолютное давление в котором меньше атмосферного.
- Степень вакуума — характеристика вакуума в интервалах давлений, определяющих соотношение средней длины свободного пути молекул с линейным размером откачиваемого сосуда, характерным для рассматриваемого процесса.

Принимают следующие интервалы давлений:

от 100 кПа до 100 Па — для низкого вакуума  
от 100 Па до 0,1 Па — для среднего вакуума  
от 0,1 Па до 10 мкПа — для высокого вакуума  
ниже 10 мкПа — для сверхвысокого вакуума

- Газ — состояние вещества, в котором движение молекул практически не ограничено межмолекулярными силами, так что вещество может занимать любое доступное пространство.

\* 1. Под газом понимают химически индивидуальный газ и смесь газов.

2. В вакуумной технике этот термин применяют к неконденсирующемуся газу и к пару.

- Идеальный газ — теоретическая модель газа, в которой не учитывается взаимодействие частиц газа (средняя кинетическая энергия частиц много больше энергии их взаимодействия). Различают классический и квантовый идеальный газ. Свойства классического идеального газа описываются законами классической физики — уравнением Клапейрона — Менделеева и его частными случаями: законами Бойля — Мариотта и Гей-Люссака. Частицы классического идеального газа распределены по энергиям согласно распределению Больцмана.

<sup>1</sup> Терминология, определения физических величин и других понятий, а также единицы величин соответствуют [10, 16, 40, 53].



При понижении температуры газа или увеличении его плотности могут становиться существенными волновые (квантовые) свойства частиц газа, когда длины волн де Бройля для них при скоростях порядка тепловых становятся сравнимыми с расстояниями между частицами [72].

- Реальный газ — газ, свойства которого в отличие от идеального газа зависят от взаимодействия молекул. Свойства реального газа описываются уравнением Ван-дер-Ваальса, а также законами квантовой статистики.
- Неконденсирующийся газ — газ, который во всем диапазоне рабочих температур не может быть переведен в конденсированную фазу только путем увеличения его давления.
- Парциальное давление газа — давление, оказываемое химически индивидуальным газом, содержащимся в газовой смеси, равное давлению, которое оказывал бы этот газ, если удалить из занимаемого газовой смесью объема остальные газы, при условии сохранения первоначальных объема и температуры.
- В [72] дано следующее определение: парциальное давление газа — давление, которое имел бы газ, находящийся в газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.
- Полное давление газа — сумма парциальных давлений компонентов газовой смеси.
- Пар — газ, верхний предел рабочих температур которого ниже температуры сжижения.
- Насыщенный пар — пар, находящийся при данной температуре в термодинамическом равновесии с одной из конденсированных фаз рассматриваемого вещества.
- Давление насыщенного пара — давление пара, находящегося при данной температуре в термодинамическом равновесии с одной из его конденсированных фаз.
- Ненасыщенный пар — пар, давление которого меньше давления насыщенного пара рассматриваемого вещества при заданной температуре.
- Степень насыщения пара — отношение давления пара к давлению насыщенного пара.
- Длина свободного пути молекулы — длина пути, проходимого молекулой между двумя последовательными столкновениями с другими молекулами.
- Средняя длина свободного пути молекулы — среднее арифметическое значение длин свободного пути молекулы.

- Диффузия газа — движение газа в другой среде под влиянием градиента концентрации.
- \* Средой может быть другой газ (в этом случае наблюдается взаимная диффузия).
- Частота столкновений — число молекул, сталкивающихся с единицей площади поверхности в единицу времени.
- Время удержания — среднее время, в течение которого молекулы удерживаются на поверхности в состоянии сорбции.
- Миграция — движение молекул на поверхности.
- Сорбция — захват газа или пара твердым телом или жидкостью.
- Физическая сорбция — сорбция под действием физических сил, при которой не образуются химические связи.
- Хемисорбция — сорбция, при которой происходит образование химических связей.
- Абсорбция — сорбция, при которой газ диффундирует в объем твердого тела или жидкости.
- Адсорбция — сорбция, при которой газ или пар удерживаются на поверхности твердого вещества или жидкости.
- Десорбция — освобождение газов или паров, сорбированных каким-либо материалом.
- Возгонка — процесс непосредственного перехода твердого тела в пар минуя жидкое состояние.
- Откачка — уменьшение молекулярной концентрации газа при помощи устройств, удаляющих или поглощающих газ.
- Элемент — чистое вещество, которое не может быть разложено на другие химически отличные, более простые чистые вещества.
- В [66] дано следующее определение:  
элемент — совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра.
- Компонент системы — вещество, которое может быть выделено из системы и которое может существовать в свободном состоянии.
- Гомогенная система — система, состоящая из одной фазы.
- Гетерогенная система — система, состоящая из двух или большего числа фаз.
- Фазовое равновесие — равновесие в гетерогенной системе, характеризующееся равенством скоростей



перехода вещества из одной фазы в другую для любой пары фаз, а также равенством химических потенциалов (см. с. 215) любого вещества, содержащегося в разных фазах.

- Фазовые переходы — процессы плавления, испарения, возгонки, конденсации, кристаллизации, превращение одной кристаллической модификации в другую.
- Фазовые переходы первого рода — обратимые превращения одной фазы в другую, сопровождающиеся тепловым эффектом и изменением объема. Примеры: плавление, кристаллизация, испарение, возгонка, конденсация.
- Фазовые переходы второго рода — фазовые переходы, не сопровождающиеся тепловым эффектом и изменением объема. Пример — переходы некоторых металлов в сверхпроводящее состояние.
- Фазовые переходы третьего рода — фазовые переходы, не сопровождающиеся тепловым эффектом, но сопровождаемые разрывом температурного коэффициента теплоемкости. Пример фазовых переходов третьего рода — переход ферромагнитного состояния железа в парамагнитное.
- Экзотермическая реакция — реакция, сопровождающаяся выделением теплоты.
- Лабильные состояния — неустойчивые состояния систем, которые ввиду медленности протекающих процессов в течение коротких интервалов наблюдения не обнаруживают существенных изменений термодинамических характеристик.
- Метастабильное (внутренне устойчивое) равновесие — такое неизменяющееся во времени состояние системы (в неизменных внешних условиях), которое самопроизвольно, после внешнего импульса, может перейти в состояние термодинамического равновесия.
- Необратимые процессы — такие процессы, которые протекают в условиях отсутствия равновесия. Необратимый круговой процесс обязательно оставляет изменения в окружающей среде.
- Термодинамически обратимый процесс — процесс, который, будучи проведен в прямом и обратном направлениях, не оставляет изменений в окружающей среде.
- Обратимые химические реакции — реакции, которые могут протекать как в прямом, так и в обратном направлениях. Переход из прямого в обратное на-

правление может быть осуществлен путем бесконечно малого изменения термодинамических параметров.

- Релаксация — процесс возвращения системы из неравновесного состояния в равновесное после прекращения действия силы, выведшей систему из равновесного состояния.
- Самопроизвольный процесс — процесс, идущий в определенном направлении без затраты энергии и ведущий к установлению состояния равновесия.
- Тройная точка вещества — инвариантное состояние вещества, в котором одновременно в равновесии находятся жидкость, насыщенный пар и кристаллы чистого вещества.

## § 9.2

### ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- Количество вещества<sup>1</sup>  $n$ ,  $\nu$  — физическая величина, равная числу структурных элементов, составляющих систему.

Количеству вещества как основной величине Международной системы единиц размерность и единица присвоены произвольно:

$$\dim n = N, [n] = 1 \text{ моль}.$$

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц [XIV ГКМВ (1971) Резолюция 3].

Если однородная система содержит  $N$  частиц, то ее количество вещества

$$n = N / N_A, \quad (9.1)$$

где  $N_A$  — постоянная Авогадро.

Наиболее достоверное значение постоянной Авогадро (на 1986 г.)

$$N_A = 6,0221367(36) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

<sup>1</sup> Обозначение  $\nu$  используется тогда, когда буквой  $n$  обозначается концентрация молекул или других частиц.



Числовое значение постоянной Авогадро называется числом Авогадро и выражает число молекул или других частиц, содержащихся в одном моле вещества.

Для неоднородной системы, например для смеси газов, количество вещества выражается соотношением

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_k}{N_A},$$

где  $N_i$  и  $n_i$  — соответственно число молекул и количество вещества  $i$ -го компонента смеси.

• Относительная атомная масса<sup>1</sup>  $A_r$  химического элемента — отношение средней массы  $\langle m_a \rangle$  атома данного элемента к  $1/12$  массы атома углерода:

$$A_r = \frac{\langle m_a \rangle}{1/12 m_{12C}}. \quad (9.2)$$

Из равенства (9.2) следует, что относительная атомная масса — величина безразмерная и выражается в относительных единицах.

\* Относительные атомные массы химических элементов приведены в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

• Относительная молекулярная масса  $M_r$  вещества — величина, равная отношению средней массы  $\langle m_m \rangle$  молекулы данного вещества к  $1/12$  массы атома изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ :

$$M_r = \frac{\langle m_m \rangle}{1/12 m_{12C}}. \quad (9.3)$$

Так же как и относительная атомная масса, относительная молекулярная масса — величина безразмерная. Размер ее зависит от состава молекулы и определяется по формуле

$$M_r = \sum n_i A_{r,i}, \quad (9.4)$$

где  $A_{r,i}$  — относительная атомная масса  $i$ -го элемента, атомы которого входят в состав молекулы данного вещества,  $n_i$  — число атомов  $i$ -го элемента в молекуле.

\* Пример. Определить относительную молекулярную массу серной кислоты.

<sup>1</sup> Ранее эта величина называлась атомным весом. Однако такое наименование неточно выражает смысл, который вкладывается в понятие «относительная атомная масса». Происхождение термина «атомный вес» исторически объясняется тем, что раньше масса и вес отождествлялись. Аналогичное замечание должно быть отнесено и к понятию «относительная молекулярная масса».

Решение. Так как в молекулу серной кислоты входят два атома водорода, один атом серы, четыре атома кислорода, то  $n_1=2$ ,  $n_2=1$ ,  $n_3=4$ .

В периодической системе элементов находим:  $A_{r,1}=1$ ,  $A_{r,2}=4$ ,  $A_{r,3}=16$ .

После подстановки этих значений  $n_i$  и  $A_{r,i}$  в формулу (9.4) найдем значение относительной молекулярной массы серной кислоты:

$$M_r = 2 \cdot 1 + 1 \cdot 32 + 4 \cdot 16 = 98.$$

• Молярная масса  $M$  вещества — величина, равная отношению массы  $m$  однородной системы к количеству вещества  $n$  этой системы:

$$M = m/n. \quad (9.5)$$

Размерность и единица молярной массы:

$$\dim M = \text{MN}^{-1}, [M] = 1 \text{ кг/моль}.$$

Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг.

Молярная масса вещества пропорциональна относительной молекулярной массе данного вещества и может быть определена из соотношения

$$M = k M_r, \quad (9.6)$$

где  $k$  — размерный коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц и равный

$k = 10^{-3}$  кг/моль (в Международной системе единиц),

$k = 1$  г/моль (в системе СГС).

\* В качестве примера воспользуемся формулой (9.6) для определения молярной массы серной кислоты. Подставим в указанную формулу значение относительной молекулярной массы серной кислоты ( $M_r = 98$ ), найденное выше, и значение коэффициента пропорциональности  $k$  в СИ:

$$M = k M_r = 10^{-3} \text{ кг/моль} \cdot 98 = 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}.$$

Рекомендуемая доляная единица молярной массы — г/моль. Если воспользоваться этой рекомендацией, то значение молярной массы серной кислоты можно записать в виде

$$M = 98 \text{ г/моль}.$$

Заметим, что значение молярной массы, выраженной в г/моль, численно совпадает с относительной молекулярной массой.

• Молярный объем  $V_m$  — величина, равная отношению объема однородной системы к количеству вещества  $n$  системы:

$$V_m = V/n.$$



Размерность и единица молярного объема:

$$\dim V = L^3 N^{-1}, [V_m] = 1 \text{ м}^3/\text{моль}.$$

Кубический метр на моль равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объем 1 м<sup>3</sup>.

Рекомендуемые дольные единицы молярного объема: дм<sup>3</sup>/моль, см<sup>3</sup>/моль и дольная единица, образованная от единицы, не входящей в СИ, л/моль.

\* Приведем в качестве примера молярный объем идеального газа при температуре  $T = 273,15 \text{ К}$  и давлении  $p = 101,325 \text{ кПа}$ :

$$V_{m,0} = 22,414 \cdot 10(19) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль} \text{ (по состоянию на 1986 г.)}.$$

● Молярная газовая постоянная (нрк. универсальная газовая постоянная)  $R$  — постоянная, входящая в уравнение состояния одного моля идеального газа:

$$pV_m = RT, \quad (9.7)$$

где  $p$  — давление,  $V_m$  — молярный объем,  $T$  — термодинамическая температура.

Молярная газовая постоянная равна работе расширения одного моля идеального газа при нагревании его на 1 К под постоянным давлением.

Из (9.7) следует

$$R = \frac{pV_m}{T}.$$

Размерность и единица молярной газовой постоянной:

$$\dim R = L^2 M T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}, [R] = 1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Значение молярной газовой постоянной (на 1986 г.)

$$R = 8,314510(70) \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

● Удельная газовая постоянная  $B$  — величина, равная отношению молярной газовой постоянной к молярной массе вещества:

$$B = R/M.$$

В отличие от молярной газовой постоянной удельная газовая постоянная имеет разные значения для различных веществ.

Размерность и единица удельной газовой постоянной:

$$\dim B = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}, [B] = 1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной газовой постоянной идеального газа массой 1 кг, совер-

шающего при повышении температуры на 1 К при постоянном давлении работу 1 Дж.

● Градиент плотности  $\text{grad } \rho$  — векторная величина, характеризующая скорость изменения плотности среды в некотором направлении и определяемая равенством

$$\text{grad } \rho = (d\rho/dx)\mathbf{i},$$

где  $\mathbf{i}$  — единичный вектор оси  $x$ .

В случае равномерного изменения плотности среды это соотношение можно записать в виде

$$\text{grad } \rho = (\Delta\rho/\Delta x)\mathbf{i}.$$

Размерность и единица градиента плотности:

$$\dim \text{grad } \rho = L^{-4} M, [\text{grad } \rho] = \frac{1 \text{ кг}/\text{м}^3}{1 \text{ м}} = 1 \text{ кг}/\text{м}^4.$$

Килограмм на метр в четвертой степени равен градиенту плотности среды, плотность которой на участке длиной 1 м в направлении градиента изменяется на 1 кг/м<sup>3</sup>.

● Коэффициент диффузии  $D$  — физическая величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности между массой  $\Delta m$  газа, перенесенного за время  $\Delta t$ , через поверхность площадью  $S$ , и градиентом плотности  $\text{grad } \rho$  газа:

$$\Delta m = -D \frac{d\rho}{dx} S \Delta t.$$

Из этой формулы получим

$$D = - \frac{\Delta m}{(d\rho/dx) S \Delta t}.$$

Размерность и единица коэффициента диффузии:

$$\dim D = L^2 T^{-1}, [D] = 1 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Квадратный метр в секунду равен коэффициенту диффузии газа, в котором через плоскую поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, перпендикулярную градиенту плотности, равному 1 кг/м<sup>4</sup>, переносится в 1 с вещество массой 1 кг.

● Внутренняя энергия  $U$  — энергия физической системы, зависящая от ее внутреннего состояния. Внутренняя энергия включает энергию хаотического (теплового) движения всех микрочастиц системы (молекул, атомов, ионов и т. д.) и энергию взаимодействия этих частиц.



Кинетическая энергия движения системы как целого и ее потенциальная энергия во внешних силовых полях во внутреннюю энергию не входят.

Внутренняя энергия идеального газа состоит только из кинетической энергии молекул и потому зависит только от температуры. В термодинамике и ее приложениях представляет интерес не сама внутренняя энергия, а ее изменения  $\Delta U$  при изменениях состояния системы.

Внутренняя энергия выражается в джоулях и имеет размерность  $L^2MT^{-2}$ .

Рекомендуемые кратные и дольные единицы внутренней энергии: ТДж, ГДж, МДж, кДж, мДж.

• Молярная термодинамическая величина  $X_m$  — величина, равная отношению экстенсивного термодинамического параметра  $X$  к количеству вещества  $n$  параметра:

$$X_m = X/n.$$

Размерность и единица молярной термодинамической величины:

$$\dim X_m = \dim X / \dim n, [X_m] = [X] / [n].$$

Молярными термодинамическими величинами являются, например, молярная теплоемкость, молярная внутренняя энергия и др.

• Молярная теплоемкость  $C_m$  — величина, равная отношению теплоемкости однородной системы к количеству вещества этой системы:

$$C_m = C/n.$$

Размерность и единица молярной теплоемкости:

$$\dim C_m = \dim C / \dim n = L^2MT^{-2}\Theta^{-1}N^{-1},$$

$$[C_m] = \frac{[C]}{[n]} = \frac{1 \text{ Дж/К}}{1 \text{ моль}} = 1 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

Джоуль на моль-кельвин равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкость 1 Дж/К.

• Молярная внутренняя энергия  $U_m$  — величина, равная отношению внутренней энергии  $U$  однородной системы к количеству вещества  $n$  этой системы:

$$U_m = U/n.$$

Размерность и единица молярной внутренней энергии:

$$\dim U_m = \frac{\dim U}{\dim n} = \frac{L^2MT^{-2}}{N} = L^2MT^{-2}N^{-1},$$

$$[U_m] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ моль}} = 1 \text{ Дж/моль}.$$

Джоуль на моль равен молярной внутренней энергии вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль внутреннюю энергию 1 Дж.

Рекомендуемая кратная единица молярной внутренней энергии — кДж/моль.

• Молярная энтропия  $S_m$  — величина, равная отношению энтропии к количеству вещества:

$$S_m = S/n.$$

Размерность и единица молярной энтропии:

$$\dim S_m = \frac{\dim S}{\dim n} = L^2MT^{-2}\Theta^{-1}N^{-1},$$

$$[S_m] = \frac{1 \text{ Дж/К}}{1 \text{ моль}} = 1 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

Джоуль на моль-кельвин равен молярной энтропии вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль энтропию 1 Дж/К.

• Концентрация молекул<sup>1</sup>  $n$  — величина, равная отношению числа  $N$  молекул (частиц), содержащихся в системе, к ее объему  $V$ :

$$n = N/V.$$

Размерность и единица концентрации молекул:

$$\dim n = L^{-3}, [n] = 1 \text{ м}^{-3}.$$

Метр в минус третьей степени равен концентрации молекул, при которой в пространстве объемом 1 м<sup>3</sup> содержится 1 молекула (частица).

• Массовая концентрация компонента  $B$  (нрк. массово-объемная концентрация)  $\rho_B$  — величина, равная отношению массы  $m$  компонента  $B$  к объему  $V$  смеси (раствора):

$$\rho_B = \frac{m}{V}.$$

<sup>1</sup> В [40] эта величина называется плотностью молекул (или частиц).

<sup>1</sup> Размерность теплоемкости  $C$  см. на с. 96.



Размерность и единица массовой концентрации компонента:

$$\dim \rho_B = L^{-3} M, [\rho_B] = 1 \text{ кг/м}^3.$$

*Килограмм на кубический метр* равен массовой концентрации компонента, при которой в объеме смеси (раствора)  $1 \text{ м}^3$  содержится компонент  $B$  массой  $1 \text{ кг}$ .

● Молярная концентрация (нрк. мольно-объемная концентрация. Молярность) компонента  $B$  в растворе  $C_B$  — величина, равная отношению количества вещества компонента  $B$  в растворе к объему раствора:

$$C_B = \frac{n}{V}.$$

Размерность и единица молярной концентрации:

$$\dim C_B = L^{-3} N, [C_B] = 1 \text{ моль/м}^3.$$

*Моль на кубический метр* равен молярной концентрации вещества в растворе, при которой в объеме раствора  $1 \text{ м}^3$  содержится количество растворенного вещества, равное  $1 \text{ моль}$ .

Рекомендуемые кратные единицы молярной концентрации:  $\text{кмоль/м}^3$ ,  $\text{моль/дм}^3$ ,  $\text{моль/л}$ .

● Моляльность (нрк. мольно-массовая концентрация) растворенного компонента  $B$   $b_B$  — величина, равная отношению количества вещества  $n$  растворенного компонента  $B$  к массе растворителя:

$$b_B = \frac{n_B}{m}.$$

Размерность и единица моляльности:

$$\dim b_B = \frac{\dim n_B}{\dim m} = \frac{N}{M} = M^{-1} N,$$

$$[b_B] = \frac{1 \text{ моль}}{1 \text{ кг}} = 1 \text{ моль/кг}.$$

*Моль на килограмм* равен моляльности растворенного компонента, при которой  $1 \text{ моль}$  растворенного компонента содержится в растворителе массой  $1 \text{ кг}$ .

● Доля компонента  $B$  (нрк. концентрация компонента) в системе (смеси, растворе, сплаве)  $w$  — величина, равная отношению массы (объема, количества вещества) компонента соответственно к массе (объему, количеству вещества) всей системы.

Доля компонента — величина безразмерная и выражается в относительных единицах [число 1, процент (%), промилле (‰), миллионная доля ( $\text{млн}^{-1}$ )].

\* Безразмерное отношение массы, объема или количества вещества компонента соответственно к массе, объему или количеству вещества остальной части системы (смеси, раствора, сплава) нельзя называть ни долей, ни концентрацией. Такое отношение следует именовать стандартизованным термином «отношение» (массовое, объемное, молярное).

Различают доли массовую, объемную, молярную.

● Массовая доля  $w_B$  компонента  $B$  — величина, равная отношению массы  $m_B$  компонента  $B$  к массе  $m$  всей системы:

$$w_B = m_B / m.$$

● Объемная доля компонента  $\varphi_B$  компонента  $B$  — отношение объема  $V_B$  компонента к объему  $V$  всей системы:

$$w_B = V_B / V.$$

● Молярная доля  $X_B$  компонента  $B$  — отношение количества вещества  $n_B$  компонента  $B$  к количеству вещества  $n$  системы:

$$X_B = n_B / n.$$

● Подвижностью  $b$  ионов (электронов) в газах и низкотемпературной плазме называют физическую величину, равную отношению средней скорости  $\langle v \rangle$  направленного движения ионов или электронов к напряженности  $E$  электрического поля:

$$b = \langle v \rangle / E.$$

Размерность и единица подвижности ионов (электронов):

$$\dim b = \frac{\dim v}{\dim E} = M^{-1} T^2 I,$$

$$[b] = [v] / [E] = (1 \text{ м/с}) / (1 \text{ В/м}) = 1 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}).$$

*Квадратный метр на вольт-секунду* равен подвижности ионов и электронов в газе и низкотемпературной плазме, при которой напряженности электрического поля  $1 \text{ В/м}$  соответствует скорость ионов и электронов  $1 \text{ м/с}$ .

● Молярное отношение растворенного компонента  $r_B$  — отношение количества вещества  $n_B$  растворенного компонента  $B$  к количеству вещества  $n_r$  растворителя:



$$r_B = n_B / n_p.$$

Из этого соотношения следует, что молярное отношение растворенного компонента — величина безразмерная и выражается в относительных единицах.

• Парциальное давление  $p_B$  — давление, которое имел бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре. Общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных составляющих смеси [72].

Парциальное давление  $p_B$  компонента  $B$  в газовой смеси может быть выражено как произведение молярной доли компонента  $B$  на давление  $p$  смеси:

$$p_B = X_B p.$$

Так как молярная доля  $X$  компонента — величина безразмерная, то парциальное давление имеет размерность давления и выражается в паскалях:

$$\dim p_B = L^{-1} M T^{-2}, [p_B] = 1 \text{ Па}.$$

• Скорость химической реакции  $w$  — величина, равная отношению изменения  $dC$  молярной концентрации исходного вещества в растворе к интервалу времени  $dt$ , в течение которого шла реакция:

$$w = dC / dt.$$

Если выразить графически концентрацию как функцию времени  $t$  (рис. 9.1), то в каждый момент времени мгновенная скорость химической реакции численно равна тангенсу угла наклона касательной к кривой  $C = f(t)$  в рассматриваемой точке:

$$dC / dt = \operatorname{tg} \alpha.$$

Скорость химической реакции может быть положительной или отрицательной величиной в зависимости от того, исчезает или образуется данное вещество в ходе реакции.

Размерность и единица скорости химической реакции:

$$\dim w = \frac{\dim C_B}{\dim t} = \frac{L^{-3} N}{T} = L^{-3} T^{-1} N,$$

$$[w] = \frac{[C_B]}{[t]} = \frac{1 \text{ моль/м}^3}{1 \text{ с}} = 1 \text{ моль/}(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Моль на кубический метр в секунду равен средней скорости одномолекулярной химической реакции, при которой за время 1 с молярная концентрация исходного вещества в растворе изменяется на 1 моль/м<sup>3</sup>.

• Тепловой эффект химической реакции  $Q$  — энергия, выделяемая или поглощаемая в ходе реакции.

Размерность и единица теплового эффекта химической реакции:

$$\dim Q = L^2 M T^{-2}, [Q] = 1 \text{ Дж}.$$

• Химический потенциал  $\mu$  — термодинамическая функция состояния, определяющая изменение термодинамических потенциалов при изменении числа частиц в системе и необходимая для описания свойств открытой системы (системы с переменным числом частиц).

Химический потенциал  $i$ -го компонента многокомпонентной системы равен частной производной от любого из термодинамических потенциалов по количеству вещества (числу частиц) этого компонента при постоянных значениях остальных термодинамических переменных, определяющих данный термодинамический потенциал.

Химический потенциал компонента  $\mu$  для смеси с компонентами  $B, C, \dots$  определяется соотношением

$$\mu_B = (\partial G / \partial n_B)_{T, p, n_C},$$

где  $n_B$  — количество вещества компонента  $B$ ,  $G$  — энергия Гиббса.

Для чистого вещества химический потенциал

$$\mu_B = G / n = G_m,$$

где  $G_m$  — молярная энергия Гиббса,  $n$  — количество вещества.

Размерность и единица химического потенциала:

$$\dim \mu_B = L^2 M T^{-2} N^{-1}; [\mu_B] = 1 \text{ Дж/моль}.$$

В [72] химическим потенциалом называется также величина, равная отношению энергии Гиббса  $G$  к числу частиц  $N_C$  системы:

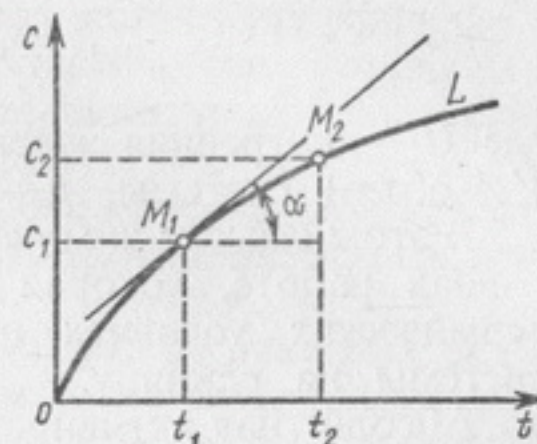


Рис. 9.1. К понятию «скорость химической реакции»:  $L$  — кривая зависимости молярной концентрации раствора от времени,  $\alpha$  — угол между касательной к кривой в некоторой точке  $M_1$ , соответствующей моменту времени  $t_1$ , и осью времени



$$\mu = \frac{G}{N_c} = \frac{U - TS + pV}{N_c},$$

где  $U$  — внутренняя энергия системы,  $S$  — ее энтропия,  $V$  — объем системы,  $p$  — давление.

В этом смысле химический потенциал есть величина, равная работе, которая совершается в изобарно-изотермических условиях при увеличении числа частиц системы на единицу.

● Абсолютная активность компонента  $B$   $\lambda_B$  — функция состояния вещества, находящегося в чистом состоянии или в смеси с другими веществами, являющаяся количественной характеристикой реакционной способности вещества в заданных условиях и связанная с химическим потенциалом  $\mu_B$  соотношением

$$\lambda_B = \exp[\mu_B/(RT)],$$

где  $R$  — молярная газовая постоянная,  $T$  — термодинамическая температура.

Так как  $\mu_B$  и  $RT$  — величины однородные (имеют одинаковую размерность и выражаются в одинаковых единицах), то абсолютная активность — величина безразмерная и выражается в относительных единицах:

$$\dim \lambda_B = 1, [\lambda_B] = 1.$$

● Относительная активность  $a_x$  компонента в смеси — число, определяемое отношением абсолютной активности  $\lambda_B$  вещества в заданном состоянии к абсолютной активности  $\lambda_B^0$  этого вещества в стандартном состоянии при одной и той же температуре:

$$a_{x,B} = \lambda_B / \lambda_B^0.$$

Из этого равенства следует, что относительная активность — величина безразмерная и выражается в относительных единицах.

● Летучесть (фугитивность) компонента  $f_B$  — термодинамическая функция, характеризующая вещество  $B$  в данной фазе, имеющая размерность давления и определяемая равенствами

$$\lim_{p \rightarrow 0} f_B / p_B = 1,$$

$$\ln \frac{f_B}{f_B^0} = \frac{\mu_B - \mu_B^0}{RT},$$

где  $p$  — общее давление;  $p_B$  — парциальное давление вещества  $B$  в фазе, если она газообразна, или

в равновесном паре, если фаза конденсированная;  $f_B^0$ ,  $f_B^*$  и  $\mu_B^0$ ,  $\mu_B^*$  — летучести и химические потенциалы вещества  $B$  для двух равнотемпературных состояний (') и (") рассматриваемой фазы [59].

Летучесть количественно характеризует способность вещества к «выходу» из конденсированной фазы в данных условиях.

● Осмотическое давление  $\pi$  — избыток давления, необходимого для поддержания осмотического равновесия между раствором и чистым растворителем, разделенных мембраной, проницаемой только для растворителя. Осмотическое давление имеет размерность давления и выражается в паскалях.

● Зарядное число  $Z$  — величина, равная отношению заряда иона к элементарному заряду:

$$Z = Q/e.$$

Отсюда следует, что зарядное число — величина безразмерная и выражается в относительных единицах. Для отрицательного иона зарядное число — величина отрицательная.

● Ионная сила  $I$  раствора — величина, определяемая соотношением

$$I = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 b_i,$$

где сумма распространяется на все ионы моляльности.

Размерность и единица ионной силы:

$$\dim I = M^{-1}N, [I] = 1 \text{ моль/кг.}$$

● Степень диссоциации  $\alpha$  — отношение числа диссоциированных молекул к общему числу молекул. Эта величина безразмерная.

● Проводимость электролита  $G$  — отношение электролитической плотности тока к напряженности электрического поля:

$$G = j/E.$$

Размерность и единица проводимости электролита:

$$\dim G = L^{-3}M^{-1}T^3I^2, [G] = 1 \text{ См/м.}$$

● Подвижность ионов  $b$  — величина, равная отношению направленной скорости ионов, вызванной электрическим полем, к напряженности этого поля:



$$b = v/E.$$

Размерность и единица подвижности ионов:

$$\dim b = M^{-1}T^2I, [b] = 1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}).$$

- Молекулярная рефракция  $R$  — величина, связывающая электронную поляризуемость  $\alpha = p/E$  вещества с его показателем преломления и определяемая равенством

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \pi N_A \alpha_{\text{эл}},$$

где  $N_A$  — постоянная Авогадро;  $N$  — молярная масса вещества;  $\rho$  — его плотность;  $p$  — дипольный электрический момент атомов, ионов, молекул и других частиц;  $E$  — напряженность электрического поля.

Если учесть, что  $\dim N_A = N^{-1}$ ,  $[N_A] = 1 \text{ моль}$ ,  $\dim p = LTI$ ,  $[p] = 1 \text{ Кл} \cdot \text{м}$ ,  $\dim E = LMT^{-3}I^{-1}$ ,  $[E] = 1 \text{ В/м}$ , то найдем следующие размерность и единицу молекулярной рефракции:

$$\dim R = M^{-1}T^4I^2N^{-1}, [R] = 1 \text{ Кл} \cdot \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{моль})$$

(кулон-квадратный метр на вольт-моль).

## Глава 10

### АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

#### § 10.1

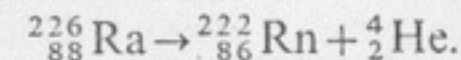
#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ<sup>1</sup>

● Атомная физика — раздел физики, в котором изучают строение и свойства атома и элементарные процессы на атомном уровне. Для атомной физики наиболее характерны расстояния  $\sim 10^{-10}$  м (т. е. порядка размеров атома) и энергии элементарных процессов порядка нескольких электрон-вольт (для ядерной физики соответствующие величины порядка  $10^{-15}$  м и нескольких мегаэлектрон-вольт). Строение вещества и элементарные процессы на атомном уровне обусловлены электромагнитными взаимодействиями. Теоретическая основа атомной физики — квантовая механика.

● Ядерная физика — раздел физики, посвященный изучению структуры атомного ядра, процессов радиоактивного распада и механизма ядерных реакций.

● Адроны — класс элементарных частиц, участвующих в сильном взаимодействии. К адронам относятся все барионы и мезоны, включая резонансы.

● Альфа-распад — распад атомных ядер, сопровождающийся испусканием  $\alpha$ -частицы. При альфа-распаде заряд ядра  $Z$  (в единицах элементарного заряда) уменьшается на 2 единицы, а массовое число  $A$  — на 4 единицы, например



● Альфа-частица ( $\alpha$ -частица) — ядро  ${}^4_2\text{He}$ , содержащее 2 протона и 2 нейтрона. Масса альфа-частицы  $m_\alpha = 4,00273 \text{ а. е. м} = 6,644 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ , спин и магнитный момент равны 0. Энергия связи 28,11 МэВ.

<sup>1</sup> Терминология и определения основных понятий, включенных в настоящий параграф, соответствуют [41, 45, 71, 72]. Для удобства использования понятия расположены в алфавитном порядке.



- Аннигиляция пары частица — античастица — один из видов взаимопревращения элементарных частиц. В процессе аннигиляции пары позитрон — электрон при нулевом суммарном спине сталкивающихся частиц ( $J=0$ ), испускается четное число  $\gamma$ -квантов (практически два), а при  $J=1$  — нечетное (практически три).

Столкновение любой частицы с ее античастицей может приводить к их аннигиляции.

Процесс, обратный аннигиляции, называется рождением пары — при взаимодействии электромагнитных или других полей одновременно возникают частица и античастица.

- Антибарионы — элементарные частицы, являющиеся античастицами по отношению к барионам.
- Антивещество — материя, построенная из античастиц. Ядра атомов вещества состоят из протонов и нейтронов, а электроны образуют оболочки атомов. В антивеществе ядра состоят из антипротонов и антинейтронов, а место электронов в их оболочках занимают позитроны.
- Антинейтрино — нейтральная элементарная частица с нулевой массой и полужелым спином, являющаяся античастицей по отношению к нейтрино.
- Антинейтрон — античастица по отношению к нейтрону. Барионные заряды и магнитные моменты антинейтрона и нейтрона равны по размеру, но противоположны по знаку. Антинейтрон открыт в 1956 г.
- Антипротон — античастица по отношению к протону. Массы и спины антипротона и протона равны, а электрические и барионные заряды и магнитные моменты одинаковы по размеру, но противоположны по знаку. Существование антипротона было предсказано теоретически, экспериментально обнаружен в 1955 г.
- Античастицы — совокупность элементарных частиц, имеющих те же значения масс и прочих физических характеристик, что и их «двойники» — частицы, но отличающихся от них знаком некоторых характеристик взаимодействий (например, электрического заряда, магнитного момента). Название «частица» и «античастица» в известной мере условно: можно было бы называть позитрон частицей, а электрон — античастицей. Однако атомы вещества в наблюдаемой части Вселенной содержат электроны с отрицательным знаком, а про-

тоны — с положительным. Поэтому для электрона и протона (а позднее и нейтрона) было принято название «частица».

● Атом — часть вещества микроскопических размеров и массы (микрочастица), наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств. Каждому химическому элементу соответствует определенный ряд атома, обозначаемый химическим символом. Атомы существуют в свободном (в газе) и связанном состояниях. Связываясь друг с другом непосредственно или в составе молекул, атомы образуют жидкие и твердые тела.

● Атомное ядро — центральная массивная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов (нуклонов). Масса атомного ядра примерно в  $4 \cdot 10^3$  раз больше массы всех входящих в состав атома электронов. Размеры атомного ядра составляют  $10^{-12}$  —  $10^{-13}$  см. Электрический заряд ядра положителен и по размеру равен сумме зарядов электронов нейтрального атома.

● Атомный номер — номер элемента в периодической системе элементов. Атомный номер равен числу протонов в атомном ядре. Определяет химические и большинство физических свойств атома.

● Барионы — группа «тяжелых» элементарных частиц с полужелым спином и массой не меньше массы протона. К барионам относятся протон, нейтрон, гипероны и некоторые другие частицы. Барионы нестабильны и путем последовательных распадов превращаются в протон и легкие частицы.

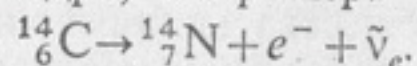
● Барионный заряд (барионное число)  $B$  — одна из внутренних характеристик элементарных частиц, отличная от нуля для барионов и равная нулю для всех остальных частиц. Барионный заряд барионов полагают равным единице, а антибарионов — минус единице. Барионный заряд системы частиц равен разности между числами барионов и антибарионов в системе.

● Бета-распад ( $\beta$ -распад) — самопроизвольные (спонтанные) превращения нейтрона  $n$  в протон  $p$  и протона в нейтрон внутри атомного ядра (а также превращение в протон свободного нейтрона), сопровождающиеся испусканием электрона  $e^-$ , позитрона  $e^+$  и электронных антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  или нейтрино  $\nu_e$ .

Известны два вида бета-распада:



1.  $\beta^-$ -распад:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ , — при котором образуется ядро с числом протонов  $Z$  на единицу больше, чем у исходного ядра, например:

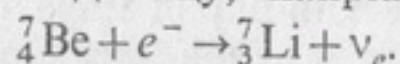


Простейшим примером  $\beta^-$ -распада является распад свободного нейтрона.

2. Позитронный бета-распад ( $\beta^+$ -распад):  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ , при котором образуется ядро с  $Z$  на единицу меньше, чем у исходного ядра, например



К бета-распаду относят также процесс поглощения ядром атома электрона с испусканием  $\nu_e$  (электронный захват). При электронном захвате, как и при позитронном бета-распаде, один из протонов ядра превращается в нейтрон:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$  — и число протонов  $Z$  уменьшается на единицу, например



- Бета-частицы ( $\beta$ -частицы) — электроны и позитроны, испускаемые атомными ядрами при  $\beta$ -распаде.

- Бозон (бозе-частица) — частица или квазичастица с нулевым или целочисленным спином. Бозон подчиняется статистике Бозе — Эйнштейна (отсюда название частицы). К бозонам относятся фотоны (спин 1), гравитоны (спин 2), мезоны и бозонные резонансы, составные частицы из четного числа фермионов (частиц с полуцелым спином), например атомные ядра с четным суммарным числом протонов и нейтронов (дейтрон, ядро  ${}^4\text{He}$  и т. д.), молекулы газов, а также фононы в твердом теле и в жидком  ${}^4\text{He}$ .

- Гамма-квант — фотон большой энергии (обычно выше 100 кэВ). Гамма-кванты возникают при квантовых переходах в атомных ядрах и некоторых превращениях элементарных частиц, тормозном излучении электронов высоких энергий.

- Гипероны — нестабильные элементарные частицы с массой больше нуклонной и большим (по ядерным масштабам) временем жизни; относятся к адронам и являются барионами. Гипероны обладают особым квантовым числом — странностью ( $S$ ) — и вместе с  $K$ -мезонами и некоторыми резонансами образуют группу странных частиц.

- Гравитационное взаимодействие элементарных частиц — наиболее слабое из всех известных фунда-

ментальных взаимодействий; наблюдательные проявления гравитационного взаимодействия связаны с его дальнодействующим характером.

Если вычислить силу гравитационного взаимодействия двух протонов, находящихся друг от друга на расстоянии  $10^{-13}$  см, то окажется, что она в  $10^{36}$  раз меньше силы кулоновского взаимодействия протонов на том же расстоянии.

- Гравитон — квант гравитационного поля (поля тяготения), обладающий нулевыми массой и электрическим зарядом и спином 2 (в единицах  $\hbar$ ). Экспериментально пока не обнаружен.

- Действие — физическая величина, имеющая размерность произведения импульса на перемещение или энергии на время ( $L^2MT^{-1}$ ) и выражаемая в единицах Дж·с.

- Дейтрон — ядро тяжелого изотопа водорода — дейтерия; содержит один протон и один нейтрон. Обозначается  ${}^2\text{H}$ ,  $d$  и реже  $D$ . Масса дейтрона  $m = 2,013553214(24)$  а. е. м. (по состоянию на 1986 г.), спин — 1.

- Излучение Черенкова — свечение, испускаемое при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью, превышающей скорость света для той же среды [45].

- Изобары — атомные ядра с одинаковым числом нуклонов, т. е. массовым числом и разными числами протонов и нейтронов.

- Изотопы — разновидности данного химического элемента, различающиеся по массе ядер. Обладая одинаковыми зарядами ядер  $Z$ , но различаясь числом нейтронов, изотопы имеют одинаковое строение электронных оболочек, т. е. очень близкие химические свойства, и занимают одно и то же место в периодической системе химических элементов.

- Квазичастица — элементарное возбуждение конденсированной среды (твердого тела, жидкости), ведущее себя в некоторых отношениях как квантовая частица. Такое возбуждение, как правило, связано не с движением отдельной частицы, а с согласованным движением многих (или всех) частиц системы [32].

- Квант действия — то же, что постоянная Планка.

- Квант света — то же, что фотон.

- Квантовые числа — целые или дробные числа, которые определяют возможные значения физических



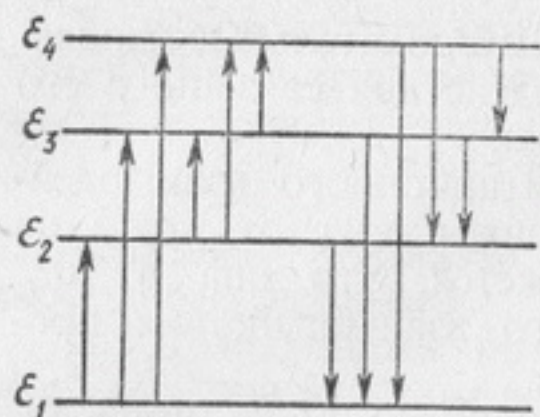


Рис. 10.1. Часть уровней квантовой системы:

$\epsilon_1$  — основной уровень,  $\epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$  — возбужденные уровни. Стрелками показаны квантовые переходы с поглощением (направление вверх) и с отдачей энергии (направление вниз).

переходе квантовой системы с одного энергетического уровня на другой. При переходе с более высокого уровня на более низкий система отдает энергию, при обратном переходе — получает энергию. На рис. 10.1 горизонтальные линии — уровни энергии, вертикальные линии показывают квантовые переходы с одного уровня на другой. Если энергия передается в виде электромагнитного излучения, справедливо равенство

$$E_k - E_i = h\nu,$$

где  $E_k - E_i$  — разность энергий двух уровней,  $h\nu$  — квант энергии ( $\nu$  — частота излучения,  $h$  — постоянная Планка).

• Кварки — гипотетические материальные объекты, из которых, по современным представлениям, состоят все известные адроны.

• К-мезоны (каоны) — группа нестабильных элементарных частиц, в которую входят две заряженные ( $K^+, K^-$ ) и две нейтральные ( $K^0, \bar{K}^0$ ) частицы с нулевым спином и массой, приблизительно в 970 раз большей, чем масса электрона. К-мезоны участвуют в сильном взаимодействии, т. е. являются адронами; они не имеют барионного заряда и обладают отличным от нуля значением квантового числа странности ( $S$ ): у  $K^+$  и  $K^0$   $S = +1$ , а у  $K^-$  и  $\bar{K}^0$  ( $\bar{K}^0$  — античастица  $K^0$ )  $S = -1$ . Совместно с гиперонами К-мезоны образуют группу странных частиц (частиц, для которых  $S \neq 0$ ). Из-за различия в странности  $K^0$  и  $\bar{K}^0$  являются разными

величин, характеризующих квантовые системы (атомное ядро, атом, молекулу и др.) и отдельные элементарные частицы.

• Квантовый переход — скачкообразный переход квантовой системы (атома, молекулы, атомного ядра, кристалла) из одного состояния в другое. Наиболее важными являются квантовые переходы между состояниями, которым соответствуют различные значения энергии.

В этом случае говорят о пе-

частицами, различным образом участвующие в сильном взаимодействии.

• Космические лучи — регулярный поток частиц высокой энергии, преимущественно протонов и  $\alpha$ -частиц, изотропно падающих на границу земной атмосферы из мирового пространства (первичное излучение), а также рожденный ими путем взаимодействия с атомными ядрами атмосферы поток вторичных частиц высокой энергии сложного состава (главным образом электронов и позитронов, мюонов,  $\pi$ -мезонов, протонов и нейтронов,  $\gamma$ -квантов, нейтрино).

• Лептоны — класс элементарных частиц, не обладающих сильным взаимодействием. К лептонам относятся электрон, мюон, нейтрино, и соответствующие им античастицы. Все лептоны имеют спин  $1/2$ , т. е. являются фермионами. Название «лептоны» (от греч. leptos — тонкий, легкий) исторически было связано с тем, что массы известных до 1975 г. лептонов были меньше всех других частиц (кроме фотона).

• Магические ядра — атомные ядра, содержащие магические числа протонов или нейтронов 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, отвечающие полностью заполненным ядерным оболочкам. Магические ядра отличаются повышенной устойчивостью и большей распространенностью в природе по сравнению с другими ядрами. Ядра, содержащие магические числа протонов и нейтронов, называются дважды магическими.

• Массовое число — число нуклонов (протонов и нейтронов) в атомном ядре. Различно для изотопов одного химического элемента. Обычно указывается слева сверху у символа химического элемента (например,  $^{27}\text{Al}$ ).

• Мезоны — нестабильные элементарные частицы, принадлежащие к классу адронов. В отличие от барионов мезоны не имеют барионного заряда и обладают нулевым или целочисленным спином (являются бозонами). Название «мезон» (от греч. mesos — средний, промежуточный) связано с тем, что массы первых открытых мезонов —  $\pi$ -мезона и К-мезона — имеют значения, промежуточные между массами протона и электрона. Так,  $\pi$ -мезон примерно в 7 раз легче протона и в 270 раз тяжелее электрона. В дальнейшем были открыты мезоны, масса которых больше массы протона.

Существуют мезоны нейтральные и заряженные с положительным или отрицательным элементарным электрическим зарядом.



- Молекула — микрочастица, наименьшая часть данного вещества, являющаяся носителем его основных химических и физических свойств и способная к самостоятельному существованию. Молекула состоит из различных или одинаковых атомов, соединенных в одно целое химическими связями. Число атомов в молекуле может изменяться от  $N=2$  (двухатомные молекулы  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $HCl$  и др.) до многих сотен и тысяч (молекулы высокомолекулярных соединений). Молекулы с  $N>2$  называются многоатомными. Размеры молекул возрастают с увеличением числа входящих в них атомов и составляют от нескольких ангстрем до сотен и тысяч ангстрем ( $10^{-8}$ — $10^{-5}$  см).
- Молекула представляет собой электрически нейтральную систему. Отдавая или присоединяя электроны, молекула превращается в положительный или отрицательный молекулярный ион.
- Мюоны (устаревшее название « $\mu$ -мезоны») — нестабильные заряженные элементарные частицы со спином  $1/2$  и массой, приблизительно в 207 раз превышающей массу электрона; относятся к классу лептонов. Отрицательно заряженный ( $\mu^-$ ) и положительно заряженный ( $\mu^+$ ) мюоны являются частицей и античастицей по отношению друг к другу.
- Нейтрино ( $\nu$ ) — легкая (возможно, безмассовая) электрически нейтральная частица со спином  $1/2$  (в единицах  $\hbar$ ), участвующая только в слабом и гравитационном взаимодействиях. Принадлежит к классу лептонов, а по статистическим свойствам является фермионом. Отличительное свойство нейтрино, определяющее его роль в природе, — огромная проникающая способность, особенно при низких энергиях. Нейтрино испускаются при превращении атомных ядер,  $\beta$ -распаде, захвате электронов и мюонов, при распадах элементарных частиц.
- Нейтрон ( $n$ ) — электрически нейтральная элементарная частица со спином  $1/2$  и массой, незначительно превышающей массу протона; относится к классу адронов и входит в группу барионов. Нейтрон в свободном состоянии — нестабильная частица, однако в связанном состоянии внутри стабильных атомных ядер он стабилен.
- Нуклид — вид атомов с данными числами протонов и нейтронов.
- Нуклоны (от лат. *nucleus* — ядро) — общее наименование для протонов и нейтронов — частиц, из которых построены все ядра атомов.

- Основное состояние квантовой системы (ядра, атома, молекулы, кристалла) — состояние, в котором система обладает наименьшей возможной энергией. Основное состояние является устойчивым.
- Пи-мезоны ( $\pi$ -мезоны, пионы) — группа из трех нестабильных бесспиновых элементарных частиц — двух заряженных ( $\pi^+$  и  $\pi^-$ ) и одной нейтральной ( $\pi^0$ ), относящихся к классу адронов и являющихся среди них наиболее легкими.
- Позитрон ( $e^+$ ) — элементарная частица с положительным электрическим зарядом, античастица по отношению к электрону ( $e^-$ ). Массы ( $m_e$ ) и спины ( $J$ ) позитрона и электрона равны, а их электрические заряды ( $e$ ), магнитные моменты ( $\mu_e$ ) равны по размеру, но противоположны по знаку.
- Позитрон участвует в электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействиях и относится к классу лептонов. По статистическим свойствам он является фермионом.
- Позитроний (химический символ  $Ps$ ) — связанная водородоподобная система ( $e^+e^-$ ), состоящая из электрона ( $e^-$ ) и позитрона ( $e^+$ ). Размеры позитрония примерно в два раза превышают размеры атома водорода. Позитроний образуется при столкновениях медленных позитронов с атомами вещества и захвате позитроном атомного электрона. Позитроний — нестабильная система, поскольку электрон и позитрон быстро аннигилируют в  $\gamma$ -кванты.
- Протон (от греч. *protos* — первый) — элементарная частица, ядро атома водорода. Масса протона  $m_p \sim 1836 m_e$ , где  $m_e$  — масса электрона. Электрический заряд протона положителен. Спин протона равен  $1/2$  (в ед.  $\hbar$ ), поэтому протон подчиняется статистике Ферми — Дирака. Вместе с нейтронами протоны образуют атомные ядра всех химических элементов, при этом число протонов в ядре равно атомному номеру данного элемента и, следовательно, определяет место элемента в периодической системе элементов Менделеева. Существует античастица по отношению к протону — антипротон.
- Протон является адроном. Кроме сильного взаимодействия он также участвует во всех других фундаментальных взаимодействиях: электромагнитном, слабом и гравитационном. Он относится к классу барионов; его барионный заряд  $B=1$ .



В сильном взаимодействии протон и нейтрон имеют одинаковые свойства и рассматриваются как два квантовых состояния одной частицы — нуклона. Важнейший пример сильного взаимодействия с участием протона — ядерные силы, связывающие нуклоны в ядре.

Современное объяснение структуры протона основано на кварковой модели адронов, согласно которой протон состоит из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка, связанных обменом другими гипотетическими частицами — глюонами.

До сих пор не обнаружены факты спонтанного распада протона. Однако в настоящее время стабильность протона считается под вопросом. Теоретически определено среднее время жизни протона:  $10^{30}$  —  $10^{32}$  лет.

- Радиоактивность — способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием частиц. К радиоактивным превращениям относятся: альфа-распад, все виды бета-распада, спонтанное деление ядер. Атомы радиоактивных элементов называют радионуклидами.

- Рассеяние — процесс, в ходе которого изменение направления или энергии падающей частицы или падающего излучения вызывается столкновением с частицей или системой частиц.

- Резонансы (резонансные частицы) — короткоживущие возбужденные состояния адронов. В отличие от других нестабильных элементарных частиц резонансы распадаются в основном за счет сильного взаимодействия. Поэтому их времена жизни лежат в интервале  $10^{-22}$  —  $10^{-24}$  с.

- Рождение пар (электронов) — одновременное образование положительного и отрицательного электронов в результате взаимодействия фотона достаточной энергии (1,02 МэВ) с полем атомного ядра или иной частицы.

- Сильное взаимодействие — одно из четырех фундаментальных взаимодействий элементарных частиц. Три остальных взаимодействия — слабое, электромагнитное и гравитационное — гораздо слабее сильного взаимодействия. В отличие от двух последних сильное взаимодействие является короткодействующим: его радиус действия  $10^{-13}$  см (ожидаемый радиус действия слабого взаимодействия  $2 \cdot 10^{-16}$  см). При столкнове-

ниях ядер или нуклонов, обладающих достаточно высокой энергией, сильное взаимодействие приводит к многочисленным ядерным реакциям.

- Слабое взаимодействие — одно из четырех известных фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами. Слабое взаимодействие значительно слабее электромагнитного и сильного взаимодействия, но гораздо сильнее гравитационного взаимодействия. Слабое взаимодействие обладает настолько малым радиусом взаимодействия, что он до сих пор не измерен. Его ожидаемый размер около  $2 \cdot 10^{-16}$  см (что на три порядка меньше радиуса сильного взаимодействия).

- Спектральная линия — линия в спектре испускания или поглощения атома или другой квантовой системы, отвечающая определенному излучающему квантовому переходу. Спектральная линия характеризуется узким (непрерывным) интервалом длин волн (частот) — шириной спектральной линии, зависящей от ширины уровней энергий системы, между которыми осуществляется переход, а также от параметров спектрального прибора. Минимальная ширина спектральной линии называется естественной или радиационной, она соответствует переходу в изолированном атоме (или в системе покоящихся невзаимодействующих атомов).

- Средняя длина свободного пробега  $\langle l \rangle$  — среднее расстояние, которое пролетают частицы данного вида до того, как они претерпят взаимодействие того или иного вида в данной среде. Таким образом, средняя длина свободного пробега может быть определена для всех взаимодействий (т. е. полная средняя длина свободного пробега) или для определенных типов взаимодействий, например для рассеяния, захвата или ионизации.

- Статистический вес — число различных квантовых состояний с данной энергией, т. е. кратность вырождения состояния.

- Тормозное излучение — электромагнитное излучение, связанное с торможением заряженных частиц. Этот термин применяется также к излучению, вызываемому ускорением заряженных частиц.

- Уровни энергии — дискретные значения энергии квантовых систем (атомов, молекул, атомных ядер, кристаллов). Совокупность уровней энергии системы определяет ее энергетический спектр.



- Фермион (ферми-частица) — частица или квазичастица, обладающая полуцелым спином. К фермионам относятся все барионы (протон, нейтрон, гипероны и др.) и лептоны (электрон, мюон, тяжелый лептон, нейтрино) и их античастицы, а также такие квазичастицы, как, например, электронное и дырочное возбуждение в твердом теле. Связанные системы из нечетного числа фермионов (атомные ядра с нечетным атомным номером, атомы с нечетным суммарным спином нуклонов ядра и электронов и др.) тоже являются фермионами.

- Фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения (в узком смысле — света). Масса покоя  $m_0$  фотона равна нулю (из опытных данных следует, что у фотона  $m_0 < 10^{-21} m_e$ , где  $m_e$  — масса электрона, и его скорость поэтому равна скорости света). Spin фотона равен 1 (в единицах постоянной Планка  $\hbar$ ), и, следовательно, фотон относится к бозонам.

- Фотоэффект — освобождение электронов, находящихся в веществе в связанном состоянии, под действием коротковолнового электромагнитного излучения. Различают внешний и внутренний фотоэффект. Внешним фотоэффектом называют испускание электронов в вакууме или иную среду из твердых тел (металлов, полупроводников, диэлектриков) под действием излучения. Внутренним фотоэффектом называют вызванные электромагнитным излучением квантовые переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате этого увеличивается электрическая проводимость тела.

- Фундаментальные взаимодействия элементарных частиц. К фундаментальным взаимодействиям относятся взаимодействия: гравитационное, слабое, сильное и электромагнитное.

- Частица (в ядерной физике) — любая элементарная частица, включая фотон. В более широком понимании — любое ядро, ион и т. д.

- Экспоненциальный распад — изменение некоторой величины (обычно активности или некоторого количества радионуклида) согласно закону

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

где  $A$  и  $A_0$  — значения рассматриваемой величины в некоторый момент времени или в начальном соответственно,  $\lambda$  — некоторая постоянная.

- Электрон — стабильная элементарная частица с отрицательным зарядом. Spin электрона равен  $1/2$ . Электрон относится к классу лептонов и участвует в электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействиях. Электрон — один из основных структурных элементов вещества: электронные оболочки атомов определяют оптические, электрические, магнитные и химические свойства атомов и молекул. Поведением электронов во многом объясняются такие явления, как теплопроводность и электропроводность металлов, поляризация диэлектриков и другие свойства веществ.

- Электрон-вольт — внесистемная единица энергии, равная энергии, которую приобретает частица с элементарным электрическим зарядом при перемещении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов 1 В ( $1 \text{ эВ} = 1,602\,177\,33(49) \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

- Электромагнитное взаимодействие — тип фундаментального взаимодействия (наряду с гравитационным, слабым и сильным), характеризующийся участием электромагнитного поля. Электромагнитное поле (в квантовой физике — фотон) либо излучается или поглощается при взаимодействии, либо переносит взаимодействие между телами. Имеет дальнodelствующий характер, неограниченный радиус действия, подобно гравитационному взаимодействию в отличие от сильного и слабого взаимодействий. Поэтому уже на атомных расстояниях ( $10^{-8} \text{ см}$ ) электромагнитные силы на много порядков превосходят ядерные силы, радиус действия которых  $\sim 10^{-13} \text{ см}$ .

- Ядро атома — центральная часть атома, состоящая из нуклонов (протонов и нейтронов). Радиус ядра увеличивается с ростом числа нуклонов пропорционально  $\sqrt[3]{A}$ , где  $A$  — массовое число и составляет для различных атомов  $(2-10) \cdot 10^{-13} \text{ см}$ . В ядре сосредоточено 99,97% массы атома. Поэтому плотность вещества ядра крайне высокая и имеет порядок  $10^{14} \text{ г/см}^3$ .

Число протонов в ядре  $Z$  определяет атомный номер элемента и его место в периодической системе элементов.

Нуклоны в ядре атома связаны особыми силами — ядерными силами, отличающимися крайне большим размером и весьма малым радиусом действия ( $10^{-13} \text{ см}$ ). Основные характеристики ядра: масса  $M$ , массовое число  $A$  (число нуклонов в ядре). Известны



ядра с числом протонов от 1 до 107 и с массовым числом  $A$  от 1 до 260.

Важными характеристиками ядра являются также спин, квадрупольный электрический момент, магнитный момент. Вместе с электрическим зарядом и массой они определяют внутреннее строение ядра и определяют его взаимодействие с внешними электрическим и магнитным полями. Квадрупольный момент ядра характеризует отклонение распределения электрических зарядов в ядре от сферически-симметричного.

Существуют ядра стабильные и нестабильные в основном состоянии. Нестабильные ядра могут спонтанно (самопроизвольно) распадаться, испуская при этом элементарные частицы (электроны, позитроны, нуклоны),  $\alpha$ -частицы или другие легкие ядра и превращаясь при этом в ядра других элементов. Это свойство атомных ядер называется радиоактивностью, а сами нестабильные ядра — радиоактивными.

Распад ядер с испусканием электронов и позитронов называется бета-распадом.

Возможен также спонтанный распад ядра на две, три или четыре части. Такой распад называется делением ядра.

Кроме спонтанного (радиоактивного) распада ядро может распадаться в результате его взаимодействия с различными налетающими на него частицами —  $\gamma$ -квантами, электронами, нуклонами, легкими ядрами,  $\pi$ -мезонами и др. В результате такого деления образуются обычно два разных ядра (как правило, близких к магическим) и один или несколько нейтронов. Эти нейтроны могут быть захвачены не разделившимися еще ядрами и вызвать их деление. Если при этом среднее число нейтронов, освобождающееся в каждом акте деления, больше одного, то может возникнуть цепная реакция.

Имеет место и обратный процесс — слияние или синтез более тяжелых ядер из легких. Примером такого процесса является синтез ядер гелия при столкновении двух ядер дейтерия с большими скоростями, достаточными для преодоления электростатического отталкивания. Так как при образовании ядра гелия выделяется энергия, намного превышающая затраты энергии на сообщение дейтронам необходимой скорости, то процесс этот может сам себя поддерживать. Такой процесс называется термоядерной реакцией.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ<sup>1</sup>

• Масса покоя частицы — масса частицы в системе отсчета, в которой она покоится. Масса покоя — одна из основных характеристик элементарной частицы. Обычно называют ее просто массой частицы.

• Энергия покоя частицы  $\epsilon$  — произведение массы покоя частицы на квадрат скорости света в вакууме:

$$\epsilon = mc^2.$$

• Элементарный электрический заряд  $e$  — электрический заряд протона.

\* Электрический заряд электрона ( $-e$ ) [41].

Элементарный электрический заряд  $e$  — наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный размеру заряда электрона [72].

По состоянию на 1986 г.  $e = 1,60217733(49) \times 10^{-19}$  Кл.

Почти все элементарные частицы обладают электрическим зарядом  $+e$  или  $-e$  или являются нейтральными. Природа такого «квантования» электрического заряда не выяснена. Частицы с другим зарядом не встречались, однако в теории элементарных частиц предполагается, что роль элементарных составляющих адронов играют частицы с зарядами, кратными  $1/3$  (кварки).

• Постоянная Планка  $h$  — фундаментальная физическая постоянная, выражающая элементарный квант действия. Размерность и единица постоянной Планка:

$$\dim h = L^2 M T^{-1}, [h] = 1 \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

По состоянию на 1986 г.  $h = 6,6260755(40) \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

\* Допускается применение постоянной  $\hbar = h/(2\pi)$ :

$$\hbar = h/(2\pi) = 1,05457266(63) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

• Постоянная тонкой структуры  $\alpha$  — фундаментальная физическая постоянная, характеризующая электромагнитное взаимодействие элементарных частиц и определяемая соотношением

$$\alpha = \mu_0 c e^2 / (2h) = 7,29735308(33) \cdot 10^{-3},$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

<sup>1</sup> Наименования и определения физических величин данного параграфа соответствуют [41, 70, 72, 45].



Название «постоянная тонкой структуры» связано с существованием тонкого расщепления спектральных линий атомов, обусловленного спин-орбитальным взаимодействием. Размер этого расщепления пропорционален  $\alpha^2$ .

Обычно используется величина  $\alpha^{-1}$ . По состоянию на 1986 г.

$$\alpha^{-1} = 137,0359895(61).$$

- Постоянная Ридберга  $R_\infty$  — фундаментальная физическая постоянная, входящая в выражения для уровней энергии и частот излучения атомов. Определяется соотношением

$$R_\infty = m_e c \alpha^2 / (2h),$$

где  $m_e$  — масса электрона,  $c$  — скорость света в вакууме,  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры,  $h$  — постоянная Планка. По состоянию на 1986 г.

$$R_\infty = 10973731,534(13) \text{ м}^{-1}.$$

\* Физическая величина  $Ry = R_\infty \cdot hc$  используется в качестве внесистемной единицы энергии в атомной физике и оптике ( $1 Ry = 13,60 \text{ эВ}$ ). Эта единица называется ридберг.

- Боровский радиус<sup>1</sup>  $a_0$  — фундаментальная физическая постоянная, равная расстоянию от ядра, на котором с наибольшей вероятностью можно обнаружить электрон в невозбужденном атоме водорода. Определяется соотношением

$$a_0 = \alpha / (4\pi R_\infty),$$

где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры,  $R_\infty$  — постоянная Ридберга.

По состоянию на 1986 г.

$$a_0 = 0,529177249(24) \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

- Классический радиус электрона — фундаментальная физическая постоянная, определяемая равенством

$$r_e = \alpha^2 a_0,$$

где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры,  $a_0$  — боровский радиус.

По состоянию на 1986 г.

$$r_e = 2,81794092(38) \cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

<sup>1</sup> По теории атома водорода Н. Бора, боровский радиус — радиус ближайшей к ядру (протону) электронной орбиты.

- Радиус ядра  $R$  — средний радиус сферы, в которой заключено ядерное вещество. Эта величина определена неточно:

$$R \approx r_0 A^{1/3},$$

где  $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ ,  $A$  — массовое число.

- Постоянная Фарадея  $F$  — фундаментальная физическая постоянная, равная произведению элементарного электрического заряда на постоянную Авогадро:

$$F = e N_A.$$

По состоянию на 1986 г.

$$F = 9,6485309(29) \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}.$$

- Магнетон — единица магнитного момента, принятая в атомной и ядерной физике и физике твердого тела.

Магнетон Бора  $\mu_B$  — фундаментальная физическая постоянная, принятая за единицу магнитного момента, в которой выражаются магнитные моменты атомных систем, обусловленных в основном орбитальным движением электрона и его спином:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c},$$

где  $m_e$  — масса электрона.

По состоянию на 1986 г.  $\mu_B = 9,2740154(31) \times 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$ .

- Ядерный магнетон  $\mu_N$  — фундаментальная физическая постоянная, принятая за единицу магнитного момента ядер:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c},$$

где  $m_p$  — масса протона.

По состоянию на 1986 г.  $\mu_N = 5,0507866(17) \times 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$ .

- Магнитомеханическое отношение (гиромагнитное отношение)  $\gamma$  — отношение магнитного момента  $\mu$  элементарной частицы к ее механическому моменту (моменту импульса)  $J\hbar$ , выраженному в квантах действия:

$$\gamma = \mu / (J\hbar),$$



где  $J$  — квантовое число механического момента,  $h$  — постоянная Планка. Характеризует действие магнитного поля на систему, обладающую магнитным моментом.

Для атома магнитомеханическое отношение определяется по формуле

$$\gamma = g\gamma_0,$$

где  $\gamma_0$  — единица магнитомеханического соотношения,  $g$  — безразмерный коэффициент пропорциональности, называемый  $g$ -фактор («же-фактор»).

При определении магнитомеханического отношения атома в качестве единицы используют  $\gamma_0 = -e/(2m_e c)$ , т. е. значение магнитомеханического отношения орбитального движения электрона; при определении магнитомеханического отношения ядер за единицу принимают аналогичную величину для протона, т. е.  $\gamma_0 = e/(2m_p c)$ , где  $m_p$  — масса протона.

Размерность и единица магнитомеханического отношения:

$$\dim \gamma = M^{-1} T I, [\gamma] = 1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}.$$

По состоянию на 1986 г. для протона

$$\gamma_p = 2,67522128(81) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}.$$

• Спин  $M_s$  — собственный угловой момент (момент импульса) элементарной частицы, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого. Спином называют также собственный момент импульса ядра и атома. Спин ядра и атома равен сумме спинов элементарных частиц, входящих в состав ядра или атома.

Спин считается внутренним свойством, присущим электрону и другим частицам, подобно тому, как им присущи масса и заряд.

Спин выражается в единицах постоянной Планка  $\hbar$ :

$$M_s = \hbar \sqrt{s(s+1)},$$

где  $s$  — спиновое квантовое число.

Квантовое число  $s$  принимает значения, равные 1 (для фотона) и  $1/2$  для электрона, протона, нейтрона. (Отсюда название «частица с полуцелым спином».)

• Ядерный квадрупольный момент  $Q$  — ожидаемое значение величины

$$\frac{1}{e} \int (3Z^2 - r^2) \rho(x, y, z) dx dy dz$$

в квантовом состоянии с ядерным спином в направлении поля  $Z$ , где  $\rho(x, y, z)$  — плотность заряда ядра,  $e$  — элементарный заряд.

Размерность и единица ядерного квадрупольного момента:

$$\dim Q = L^2, [Q] = 1 \text{ м}^2.$$

\* Величину, равную произведению ядерного квадрупольного момента на элементарный заряд, называют электрическим квадрупольным моментом ядра.

Ядерный квадрупольный момент определяет степень несферичности распределения зарядов в ядре.

• Средняя продолжительность жизни радиоактивного ядра  $\tau$  — среднее время, необходимое для уменьшения числа  $N$  атомов или ядер в данном состоянии до  $N/e$ , где  $e$  — основание натуральных логарифмов.

• Постоянная радиоактивного распада  $\lambda$  — производная вероятности распада  $w$  по времени:

$$\lambda = dw/dt.$$

Постоянная радиоактивного распада  $\lambda$  связана со средней продолжительностью жизни  $\tau$  соотношением

$$\lambda = \frac{1}{\tau}.$$

Из определения средней продолжительности жизни и постоянной радиоактивного распада следует:

$$\dim \tau = T, [\tau] = 1 \text{ с};$$

$$\dim \lambda = T^{-1}, [\lambda] = 1 \text{ с}^{-1} \text{ (секунда в минус первой степени)}.$$

• Дефект массы ядра  $B$  — разность между суммой масс нуклонов (нейтронов и протонов), составляющих атомное ядро, и массой ядра. Выражается равенствами

$$B = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a,$$

где  $m_a$  — масса ядра,  $A$  — массовое число,  $Z$  — зарядовое число; или

$$B = Zm(^1\text{H}) + Nm_n - m_a,$$

где  $m_a$  — масса атома,  $m(^1\text{H})$  — масса атома водорода,  $N$  — число нейтронов в ядре.



- Относительный дефект массы  $B_r$  — величина, равная отношению дефекта массы к атомной единице массы  $u_m$ :

$$B_r = B/u_m.$$

Очевидно, что относительный дефект массы — величина безразмерная и выражается в относительных единицах.

- Энергия связи  $E_{св}$  — величина, равная произведению дефекта массы на квадрат скорости света в вакууме:

$$E_{св} = Bc^2.$$

Энергия связи, как и любая другая энергия, имеет размерность  $L^2MT^{-2}$  и выражается в джоулях (Дж).

\* Если энергия связи атомных электронов пренебрежимо мала, то  $Bc^2$  равно энергии связи ядра, где  $B$  — дефект массы.

- Избыток массы  $\Delta$  — величина, равная разности массы атома  $m_a$  и произведения массового числа  $A$  изотопа на атомную единицу массы  $u_m$ :

$$\Delta = m_a - Au_m = A_ru_m - Au_m = (A_r - A)u_m,$$

где  $A_r$  — относительная атомная масса.

Так как относительные атомные массы  $A_r$  изотопов оказываются почти целочисленными, то разность  $A_r - A$  есть положительная или отрицательная правильная дробь, значительно меньшая  $1/2$ .

Эта правильная дробь и есть числовое значение избытка массы, выраженного в атомных единицах массы.

- Коэффициент упаковки  $f$  — отношение относительного избытка массы к массовому числу:

$$f = \Delta_r/A.$$

Очевидно, что коэффициент упаковки — величина безразмерная.

- Коэффициент связи  $b$  — отношение относительного дефекта массы к массовому числу  $A$ :

$$b = B_r/A.$$

Эта величина безразмерная.

- Время жизни  $\tau$  — средняя продолжительность существования возбужденных состояний молекул, атомов, ядер, заканчивающаяся спонтанным (самопроиз-

вольным) их переходом в менее возбужденное или основное состояние.

Размерность и единица времени жизни:  $\dim \tau = T$ ,  $[\tau] = 1 \text{ с}$ .

- Ширина уровня  $\Gamma$  — величина, равная отношению постоянной Планка к среднему времени жизни:

$$\Gamma = h/\tau.$$

Ширина уровня выражается в джоулях (Дж) и имеет размерность энергии  $\dim \Gamma = L^2MT^{-2}$ .

\* Ширину уровня допускается выражать в электрон-вольтах (эВ).

- Период полураспада  $T_{1/2}$  для экспоненциального распада — среднее время, необходимое для распада половины атомов образца радиоактивного нуклида. Для периода полураспада справедливо соотношение

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Из определения периода полураспада следует:

$$\dim T_{1/2} = T, [T_{1/2}] = 1 \text{ с}.$$

- Энергия альфа-распада  $Q_\alpha$  — сумма кинетической энергии частицы, образовавшейся в процессе распада, и энергии отдачи атома в системе отсчета, в которой излучающее ядро до его распада находится в состоянии покоя.

\* Энергия альфа-распада на основной уровень  $Q_{\alpha,0}$  включает также энергию возможного гамма-излучения [41].

- Энергия бета-распада  $Q_\beta$  — сумма максимальной энергии бета-частиц  $E_\beta$  и энергии отдачи образовавшегося атома в системе отсчета, в которой излучающее ядро до его распада находится в состоянии покоя.

\* Для излучателей положительных электронов энергия, затраченная на образование электронной пары, должна быть прибавлена к энергии бета-распада. Энергия бета-распада на основной уровень  $Q_{\beta,0}$  включает также энергию возможного гамма-излучения.



## Глава 11

### ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ<sup>1</sup>

#### § 11.1

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Ионизирующие излучения — сравнительно новый раздел физики. Величины и единицы, применяемые в этой области, непрерывно совершенствуются, состав их расширяется в соответствии с развитием теории и практических приложений ионизирующих излучений. Поэтому перечень радиационных величин и единиц не может быть полным и законченным. В данной главе приведены лишь те производные радиационные величины и единицы, которые наиболее широко используются и могут служить типовыми примерами для образования по мере необходимости других радиационных величин и единиц.

В дозиметрии, радиометрии, а также для характеристики параметров излучений получили широкое применение некоторые внесистемные единицы ионизирующих излучений, такие, как рентген, рад, бэр и кюри, единицы времени (минута, час, сутки, неделя, год), а также единица объема — литр. Замена их единицами СИ при современном состоянии соответствующих областей техники и народного хозяйства вызвала бы неоправданные трудности. Поэтому [54] предусмотрено постепенное внедрение единиц СИ в течение переходного периода до 1 января 1990 г. До этого срока разрешено применение внесистемных единиц поглощенной дозы, эквивалентной дозы, активности и производных от них величин.

В пособии наряду с единицами СИ приводятся рекомендованные предпочтительные производные единицы, образованные с использованием внесистемных единиц, допущенных к применению без ограничения срока.

В соответствии с правилами образования десятичных кратных и дольных единиц в обоснованных случаях допускается применять приставку во втором множителе произведения или в знаменателе. Например, в связи с широким применением в практике измерения ионизирующих излучений рекомендуются единицы: беккерель на миллиметр (Бк/мм), килоэлектрон-вольт на микрометр (кэВ/мкм) и ряд других десятичных кратных и дольных единиц.

#### Основные понятия

- Излучение — распространение энергии в форме волн или частиц.
- Ионизирующее излучение — излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков. Видимый свет и ультрафиолетовое излучение не включаются в понятие «ионизирующее излучение».
- Непосредственно ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении. Это излучение может состоять из электронов, протонов, альфа-частиц и др.
- Косвенно ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения. Это излучение может состоять из фотонов, нейтронов и др.
- Моноэнергетическое ионизирующее излучение (нрк. монохроматическое излучение) — ионизирующее излучение, состоящее из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией.
- Космическое излучение — ионизирующее излучение, состоящее из первичного ионизирующего излучения, поступающего из космического пространства, и вторичного ионизирующего излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения со средой.
- Фотонное ионизирующее излучение — электромагнитное косвенное ионизирующее излучение.
- Гамма-излучение (нрк. гамма-лучи) — фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц.

<sup>1</sup> Терминология и определения физических величин, а также других понятий в этой главе соответствуют [17, 42, 53, 54].



- Тормозное излучение — фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц.
- Характеристическое излучение — фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома.
- Рентгеновское излучение (нрк. рентгеновские лучи, рентгеновы лучи, лучи Рентгена) — фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучения.
- Корпускулярное излучение — ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой, отличной от нуля. Нейтронное излучение также относится к корпускулярному излучению.
- Альфа-излучение (нрк. альфа-лучи) — корпускулярное излучение, состоящее из  $\alpha$ -частиц, испускаемых при ядерных превращениях.
- Электронное излучение — корпускулярное излучение, состоящее из электронов и (или) позитронов.
- Бета-излучение (нрк. бета-лучи) — электронное излучение, возникающее при бета-распаде ядер или нестабильных частиц.
- Фотоэлектроны — электронное излучение, возникающее при фотоэлектрическом взаимодействии фотонного излучения с веществом.
- Комptonовское излучение — электронное излучение, возникающее при комptonовском (некогерентном) рассеянии фотонного излучения.
- Протонное излучение — корпускулярное излучение, состоящее из ядер  ${}^1\text{H}$ .
- Поляризованное излучение — ионизирующее излучение, состоящее из частиц с определенной ориентацией спинов и (или) фотонов с определенной ориентацией электрического вектора.

## § 11.2

### ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

- Энергия ионизирующего излучения  $w$  — суммарная энергия ионизирующих частиц, испущенная, переданная или поглощенная. Под частицами понимаются ионизирующие частицы корпускулярного излучения

и фотоны, т. е. частицы, как имеющие массу покоя, так и не имеющие массы покоя.

Энергия ионизирующего излучения, как и любая другая энергия, выражается в джоулях (Дж) и имеет размерность

$$\dim w = L^2 M T^{-2}.$$

Энергию  $E$  отдельных ионизирующих частиц неудобно выражать в джоулях

или его дольных единицах. Поэтому для энергии отдельных частиц, образующих ионизирующее излучение, рекомендуется применять единицу электрон-вольт (эВ) и образованные от него десятичные кратные единицы (кэВ, МэВ и т. д.). При использовании в расчетах испущенной, переданной или поглощенной энергии ионизирующего излучения эти единицы необходимо переводить в джоули.

Предпочтительные единицы:

для энергии  $w$  ионизирующего излучения — фДж, пДж, нДж, мкДж, мДж, Дж, кДж, МДж;

для энергии  $E$  отдельных частиц — эВ, кэВ, МэВ, ГэВ.

\* Суммарная энергия всех ионизирующих частиц не включает энергию, эквивалентную массе покоя.

- Поток ионизирующих частиц  $F$  — отношение числа  $dN$  ионизирующих частиц, проходящих через данную поверхность за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$F = dN/dt.$$

Размерность и единица потока ионизирующих частиц:

$\dim F = T^{-1}$ ,  $[F] = 1 \text{ с}^{-1}$  (секунда в минус первой степени).

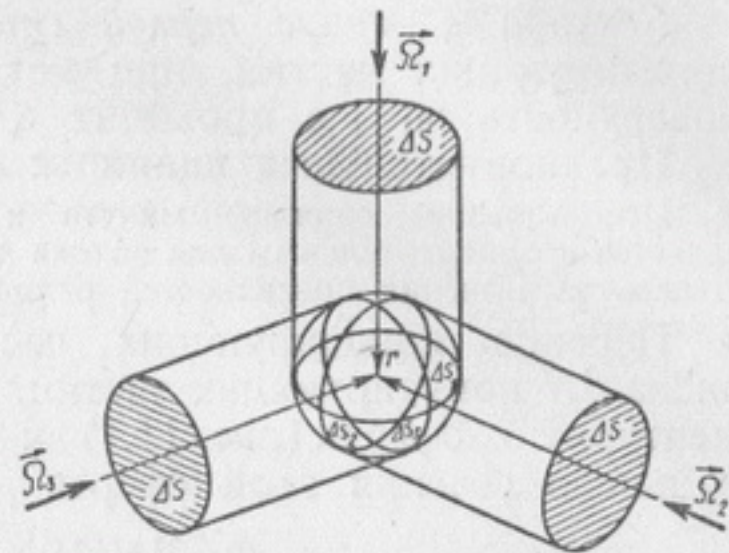


Рис. 11.1. К понятию «перенос ионизирующих частиц»:

$\vec{Q}$  — единичный вектор, указывающий направление полета ионизирующей частицы (из всех возможных направлений на рисунке показаны только три направления);  $\Delta S_i$  — площадь сечения элементарной сферы, перпендикулярного  $i$ -му направлению полета частиц;  $M$  — центр элементарной сферы



Секунда в минус первой степени равна потоку ионизирующих частиц, при котором через данную поверхность за 1 с проходит одна частица.

Предпочтительные единицы:  $\text{с}^{-1}$ ,  $\text{мин}^{-1}$ .

\* Использование единицы минута в минус первой степени является предпочтительным для потока частиц, характеризующего степень загрязнения поверхностей радиоактивными веществами.

• Перенос ионизирующих частиц  $\Phi$  — отношение числа  $dN$  ионизирующих частиц, проникающих в элементарную сферу (рис. 11.1) к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\Phi = dN/dS.$$

Размерность и единица переноса ионизирующих частиц:

$$\dim \Phi = L^{-2}, [\Phi] = 1 \text{ м}^{-2}.$$

Метр в минус второй степени равен переносу ионизирующих частиц, при котором в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  проникает одна частица.

Предпочтительная единица —  $\text{см}^{-2}$ .

• Плотность потока ионизирующих частиц  $\phi$  — отношение потока  $dF$  ионизирующих частиц, проникающих в элементарную сферу (рис. 11.1), к площади  $dS$  центрального сечений этой сферы:

$$\phi = dF/dS = d\Phi/dt = d^2N/(dSdt).$$

Размерность и единица плотности потока ионизирующих частиц:

$$\dim \phi = L^{-2}T^{-1}, [\phi] = 1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени равен плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  за 1 с проникает одна частица.

Предпочтительные единицы:

$$\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}; \text{мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}.$$

• Энергетическая плотность потока ионизирующих частиц  $\phi(E)$  — отношение плотности потока ионизирующих частиц  $\phi$  с энергией от  $E$  до  $E+dE$  к энергетическому интервалу  $dE$ :

$$\phi(E) = \frac{d\phi}{dE} = \frac{d^2F}{dSdE} = \frac{d^2\Phi}{dt dE} = \frac{d^3N}{dS dt dE}.$$

Размерность и единица энергетической плотности потока ионизирующих частиц:

$$\dim \phi(E) = L^{-4}M^{-1}T, \\ [\phi(E)] = 1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Дж}^{-1}.$$

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени равен энергетической плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  за 1 с проникает одна частица с энергией, заключенной в энергетическом интервале 1 Дж.

Предпочтительные единицы:  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ ;  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{кэВ}^{-1}$ ;  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{МэВ}^{-1}$ .

• Угловая плотность потока ионизирующих частиц  $\phi(\Omega)$  — отношение плотности потока  $d\phi$  ионизирующих частиц, распространяющихся в пределах элементарного телесного угла  $d\Omega$ , ориентированного в направлении  $\vec{\Omega}$ , к этому телесному углу (рис. 11.2):

$$\phi(\Omega) = \frac{d\phi}{d\Omega} = \frac{d^2\Phi}{dt \cdot d\Omega} = \frac{d^2F}{dS \cdot d\Omega} = \frac{d^3N}{dS dt d\Omega}.$$

Размерность и единица угловой плотности потока ионизирующих частиц:

$$\dim \phi(\Omega) = L^{-2}T^{-1}, [\phi(\Omega)] = 1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-стерадиан в минус первой степени равен угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную направлению движения частицы, за 1 с пересекает одна ионизирующая частица, движущаяся в телесном угле 1 ср.

Предпочтительная единица —  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ .

• Энергетическо-угловая плотность потока ионизирующих частиц  $\phi(E, \Omega)$  — отношение плотности потока  $\phi$  ионизирующих частиц с энергией от  $E$  до

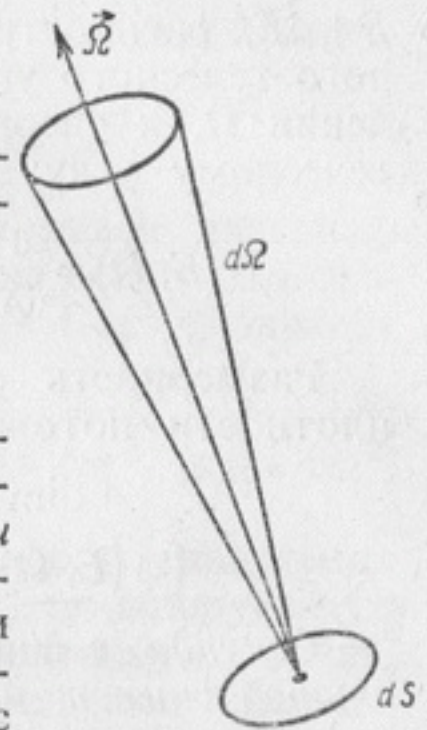


Рис. 11.2. К понятию «угловая плотность потока ионизирующих частиц»



$E + dE$ , распространяющихся в пределах элементарного телесного угла  $d\Omega$ , ориентированного в направлении  $\vec{\Omega}$ , к энергетическому интервалу  $dE$  и этому телесному углу:

$$\varphi(E, \Omega) = \frac{d^2\Phi}{dEd\Omega} = \frac{d^3F}{dSdEd\Omega} = \frac{d^3\Phi}{dt dEd\Omega} = \frac{d^4N}{dS dt dEd\Omega}.$$

Размерность и единица энергетическо-угловой плотности потока ионизирующих частиц:

$$\dim \varphi(E, \Omega) = L^{-4} M^{-1} T^{-1},$$

$$[\varphi(E, \Omega)] = 1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Дж}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени-стерадиан в минус первой степени равен энергетическо-угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную направлению движения частицы, за  $1 \text{ с}$  пересекает одна ионизирующая частица с энергией, заключенной в энергетическом интервале  $1 \text{ Дж}$ , движущаяся в телесном угле  $1 \text{ ср}$ .

Предпочтительные единицы:  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ;  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{кэВ}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ;  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{МэВ}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ .

● Поток ионизирующего излучения  $F_w$  — отношение энергии  $dW$  ионизирующего излучения, проходящего через данную поверхность за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$F_w = dW/dt.$$

Размерность и единица потока ионизирующего излучения:

$$\dim F_w = L^2 M T^{-3}, [F_w] = 1 \text{ Вт}.$$

Ватт равен потоку ионизирующего излучения, при котором через данную поверхность за  $1 \text{ с}$  проходит излучение с энергией  $1 \text{ Дж}$ .

Предпочтительные единицы: нВт, мкВт, мВт, Вт, кВт, МВт.

● Перенос энергии ионизирующего излучения  $\Phi_w$  — отношение энергии  $dW$  ионизирующего излучения, проникающего в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\Phi_w = dW/dS.$$

Размерность и единица переноса энергии ионизирующего излучения:

$$\dim \Phi_w = M T^{-2}, \Phi_w = 1 \text{ Дж/м}^2.$$

Джоуль на квадратный метр равен переносу энергии ионизирующего излучения, при котором в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  проникает излучение с энергией  $1 \text{ Дж}$ .

Предпочтительные единицы: фДж/см<sup>2</sup>, пДж/см<sup>2</sup>, нДж/см<sup>2</sup>, мкДж/см<sup>2</sup>, мДж/см<sup>2</sup>, Дж/см<sup>2</sup>, кДж/см<sup>2</sup>, МДж/см<sup>2</sup>.

● Плотность потока ионизирующего излучения  $\varphi_w$  — отношение потока энергии  $F_w$  ионизирующего излучения, проникающего в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\varphi_w = dF_w/dS = d\Phi_w/dt = \frac{d^2W}{dS dt}.$$

Размерность и единица плотности потока ионизирующего излучения:

$$\dim \varphi_w = M T^{-3}, [\varphi_w] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

Ватт на квадратный метр равен плотности потока ионизирующего излучения, при которой в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$  проникает излучение с энергией  $1 \text{ Дж}$ .

Предпочтительные единицы: нВт/см<sup>2</sup>, мкВт/см<sup>2</sup>, мВт/см<sup>2</sup>, Вт/см<sup>2</sup>, кВт/см<sup>2</sup>, МВт/см<sup>2</sup>.

### § 11.3

#### ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

● Сечение  $\sigma$  — одна из существенных и в то же время одна из наиболее трудных для понимания величин, характеризующих взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Выясним ее смысл.

Пусть частица пролетает через тонкий слой вещества с площадью поверхности  $S$ . Существует некоторая вероятность  $d$  того, что при прохождении внутри слоя частица столкнется с ядром какого-то определенного атома из числа атомов, находящихся



в этом слое. Очевидно, что вероятность такого столкновения обратно пропорциональна площади  $S$  поверхности слоя:

$$d = \sigma / S,$$

где  $\sigma$  — коэффициент пропорциональности, называемый сечением.

Так как вероятность  $d$  — величина безразмерная, то сечение  $\sigma$  имеет размерность площади и выражается в квадратных метрах:

$$\dim \sigma = L^2, [\sigma] = 1 \text{ м}^2.$$

Результаты столкновения частицы с ядром могут быть различными: поглощение частицы ядром с вылетом из него каких-нибудь ядерных частиц, упругое или неупругое рассеяние частицы и т. п. Иначе говоря, в результате взаимодействия может произойти переход системы двух взаимодействующих частиц в определенное конечное состояние. Каждому из таких конечных состояний соответствуют своя вероятность и свое парциальное значение сечения. Сечение, характеризующее вероятность перехода в одно из всех возможных переходов, равно сумме  $\sum \sigma_i$  парциальных переходов.

В [17] рассматриваются следующие виды сечений: сечение взаимодействия ионизирующих частиц, полное сечение взаимодействия ионизирующих частиц, макроскопическое сечение взаимодействия ионизирующих частиц.

• Сечение взаимодействия ионизирующих частиц (сечение взаимодействия)  $\sigma_i$  — отношение числа  $n_i$  определенного ( $i$ -го) типа взаимодействий ионизирующих частиц и частиц-мишеней в элементарном объеме при переносе  $\Phi$  ионизирующих частиц к числу  $N$  частиц мишеней в этом объеме и к этому переносу:

$$\sigma_i = n_i / (\Phi N).$$

Размерность и единица сечения взаимодействия ионизирующих частиц:

$$\dim \sigma_i = L^2, [\sigma_i] = 1 \text{ м}^2.$$

Квадратный метр равен сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержащем одну частицу-мишень в  $1 \text{ м}^3$ , перенос частиц  $1 \text{ м}^{-2}$  приводит в среднем к одному акту взаимодействия определенного типа в  $1 \text{ м}^3$ .

Предпочтительная единица —  $\text{фм}^2$ .

• Полное сечение взаимодействия ионизирующих частиц (полное сечение взаимодействия)  $\sigma$  — сумма всех сечений взаимодействия  $\sigma_i$  ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям или процессам:

$$\sigma = \sum \sigma_i.$$

Размерность и единица полного сечения взаимодействия ионизирующих частиц:

$$\dim \sigma = L^2, [\sigma] = 1 \text{ м}^2.$$

Квадратный метр равен полному сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержащем одну частицу-мишень в  $1 \text{ м}^3$ , перенос падающих частиц  $1 \text{ м}^{-2}$  приводит в среднем к одному акту взаимодействия в  $1 \text{ м}^3$ .

Предпочтительная единица —  $\text{фм}^2$ .

\* Внесистемная единица бари, равная  $100 \text{ фм}^2$ , получила широкое распространение в отечественной и зарубежной практике. Вопрос о сроках изъятия единицы бари для сечения взаимодействия требует специального согласованного международного решения.

• Макроскопическое сечение взаимодействия ионизирующих частиц (макроскопическое сечение взаимодействия)  $\Sigma_i$  — произведение сечения взаимодействия  $\sigma_i$  на концентрацию  $C$  частиц-мишеней в веществе:

$$\Sigma_i = \sigma_i C.$$

Размерность и единица макроскопического сечения взаимодействия ионизирующих частиц:

$$\dim \Sigma_i = L^{-1}, [\Sigma_i] = 1 \text{ м}^{-1}.$$

Предпочтительная единица —  $\text{см}^{-1}$ .

\* Наряду с макроскопическим сечением взаимодействия  $\Sigma_i$  используется полное макроскопическое сечение взаимодействия  $\Sigma$ , определяемое через полное сечение взаимодействия  $\sigma$ :  $\Sigma = \sigma C$ .

• Линейный коэффициент ослабления  $\mu$  — отношение доли  $dN/N$  косвенно ионизирующих частиц, испытавших взаимодействие при прохождении элементарного пути  $dI$  в веществе, к длине этого пути:

$$\mu = \frac{1}{N} \frac{dN}{dI}.$$

Размерность и единица линейного коэффициента ослабления:

$$\dim \mu = L^{-1}, [\mu] = 1 \text{ м}^{-1}.$$



Метр в минус первой степени равен линейному коэффициенту ослабления, при котором на пути 1 м плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица —  $\text{см}^{-1}$ .

● Массовый коэффициент ослабления  $\mu_m$  — отношение линейного коэффициента ослабления  $\mu$  к плотности  $\rho$  вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_m = \mu / \rho = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl}.$$

Размерность и единица массового коэффициента ослабления:

$$\dim \mu_m = L^2 M^{-1}, [\mu_m] = 1 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Квадратный метр на килограмм равен массовому коэффициенту ослабления, при котором на пути 1 м в веществе с плотностью  $1 \text{ кг/м}^3$  плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица —  $\text{см}^2/\text{г}$ .

● Атомный коэффициент ослабления  $\mu_a$  — отношение линейного коэффициента ослабления  $\mu$  к концентрации  $C$  атомов вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_a = \mu / C = \frac{1}{CN} \frac{dN}{dl}.$$

Размерность и единица атомного коэффициента ослабления:

$$\dim \mu_a = L^2, [\mu_a] = 1 \text{ м}^2.$$

Предпочтительная единица —  $\text{см}^2$ .

● Линейный коэффициент передачи энергии  $\mu_{tr}$  — отношение доли энергии  $dW/w$  косвенно ионизирующего излучения (исключая энергию покоя частиц), которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$\mu_{tr} = \frac{1}{w} \frac{dW}{dl}.$$

Размерность и единица линейного коэффициента передачи энергии:

$$\dim \mu_{tr} = L^{-1}, [\mu_{tr}] = 1 \text{ м}^{-1}.$$

Метр в минус первой степени равен линейному коэффициенту передачи энергии, при котором в веществе на пути 1 м плотность потока энергии косвенно ионизирующего излучения уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица —  $\text{см}^{-1}$ .

\* 1. Определение единиц  $\text{м}^{-1}$  и  $\text{см}^{-1}$  предполагает взаимодействие с веществом узкого моноэнергетического пучка косвенно ионизирующего излучения.

2. Индекс  $tr$  в обозначении линейного коэффициента передачи энергии образован начальными буквами слова «transfer» (передача).

● Массовый коэффициент передачи энергии  $\mu_{tr,m}$  — отношение линейного коэффициента передачи энергии  $\mu_{tr}$  к плотности  $\rho$  вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_{tr,m} = \mu_{tr} / \rho = \frac{1}{\rho w} \frac{dW}{dl}.$$

Размерность и единица массового коэффициента, передачи энергии:

$$\dim \mu_{tr,m} = L^2 M^{-1}, [\mu_{tr,m}] = 1 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Квадратный метр на килограмм равен массовому коэффициенту передачи энергии, при котором на пути 1 м в веществе с плотностью  $1 \text{ кг/м}^3$  плотность потока энергии косвенно ионизирующего излучения уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица —  $\text{см}^2/\text{г}$ .

\* См. примечания 1 и 2 к предыдущей величине.

● Линейный коэффициент поглощения энергии  $\mu_{en}$  — произведение линейного коэффициента передачи энергии  $\mu_{tr}$  на разность между единицей и долей  $g$  энергии вторичных заряженных частиц, переходящей в тормозное излучение в данном веществе:

$$\mu_{en} = \mu_{tr} (1 - g).$$

Размерность и единица линейного коэффициента поглощения энергии:

$$\dim \mu_{en} = L^{-1}, [\mu_{en}] = 1 \text{ м}^{-1}.$$



Предпочтительная единица —  $\text{см}^{-1}$ .

- \* 1. Индекс *en* в обозначении линейного коэффициента поглощения энергии образован начальными буквами слова «energy».  
2. См. примечание 1 к линейному коэффициенту передачи энергии.

• Массовый коэффициент поглощения энергии  $\mu_{en,m}$  — отношение линейного коэффициента поглощения энергии  $\mu_{en}$  к плотности  $\rho$  вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_{en,m} = \frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}(1-g)}{\rho} = \mu_{tr,m}(1-g).$$

Размерность и единица массового коэффициента поглощения энергии

$$\dim \mu_{en,m} = L^2 M^{-1}, [\mu_{en,m}] = 1 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Предпочтительная единица —  $\text{см}^2/\text{г}$ .

- \* 1. Определение единиц  $\text{м}^2/\text{кг}$  и  $\text{см}^2/\text{г}$  предполагает взаимодействие с веществом узкого моноэнергетического пучка косвенно ионизирующего излучения.

2. См. примечание 2 к линейному коэффициенту передачи энергии.

#### § 11.4

### ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ<sup>1</sup>

• Поглощенная доза ионизирующего излучения (доза излучения)  $D$  — отношение средней энергии  $dW$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$D = dW/dm.$$

Размерность и единица поглощенной дозы ионизирующего излучения

$$\dim D = L^2 T^{-2}, [D] = 1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ Гр}.$$

Грей равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нГр, мкГр, мГр, кГр, МГр.

<sup>1</sup> Рекомендации по применению единиц дозиметрических величин заимствованы из нормативного документа [54].

Процесс прохождения ионизирующего излучения через вещество связан с поглощением энергии, при этом поглощенная веществом энергия равна потере энергии излучением. Поглощенная доза излучения показывает потерю энергии излучения на единицу массы вещества и в то же время энергию, приобретенную веществом на единицу его массы.

- \* 1. Поглощенная доза излучения является основной величиной, определяющей степень радиационного воздействия.

Области использования поглощенной дозы — лучевая терапия, радиационная технология, радиобиологические и радиационно-материаловедческие исследования, радиационная безопасность (аварийное облучение).

При терапевтическом использовании ионизирующих излучений и аварийном облучении предпочтительной единицей поглощенной дозы должен быть грей вне зависимости от размера величины. Эта же единица является предпочтительной при нанесении на шкалы клинических и аварийных дозаторов.

При технологическом применении излучений, радиобиологических и радиационно-материаловедческих исследований помимо единицы грей должны использоваться десятичные дольные и кратные ей единицы. В этих случаях десятичные дольные и кратные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения поглощенной дозы находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

2. Под переданной энергией понимается выражение  $w_{tr} = w_1 - w_2 - \Sigma Q$ , где  $w_1$  — энергия всех заряженных и незаряженных частиц (без учета энергии покоя), которые входят в рассматриваемый объем;  $w_2$  — энергия всех заряженных и незаряженных частиц (без учета энергии покоя), которые выходят из этого объема,  $\Sigma Q$  — сумма всех изменений энергии (уменьшение со знаком плюс, увеличение со знаком минус), связанных с массой покоя частиц при любых ядерных превращениях, происходящих в объеме.

• Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения (мощность дозы излучения)  $\dot{D}$  — отношение приращения  $dD$  поглощенной дозы за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{D} = dD/dt.$$

Размерность и единица мощности поглощенной дозы:

$$\dim \dot{D} = L^2 T^{-3}, [\dot{D}] = 1 \text{ Гр/с}.$$

Грей в секунду равен мощности поглощенной дозы излучения, при которой за 1 с в веществе создается доза излучения 1 Гр.

Время пребывания человека в условиях повышенного уровня ионизирующего излучения, как правило, измеряется минутами. Поэтому предпочтительной единицей для мощности поглощенной дозы в области



радиационной безопасности (аварийное облучение) должен быть миллигрей в минуту (мГр/мин) вне зависимости от размера величины. Эта единица является предпочтительной и для нанесения на шкалы измерителей мощности поглощенной дозы, используемых при контроле радиационной безопасности.

Длительность сеансов облучения при терапевтических процедурах измеряется, как правило, в минутах. Поэтому предпочтительной единицей в этом случае должен быть грей в минуту (Гр/мин). При технологическом применении излучений, радиобиологических и радиационно-материаловедческих исследованиях могут быть использованы производные единицы мощности поглощенной дозы, образованные из десятичных дольных и кратных грею единиц и любых допущенных к применению единиц времени. Конкретный выбор единиц мощности поглощенной дозы должен определяться удобством ее использования и подчиняться правилам образования единиц [16].

• Керма  $K$  — отношение суммы начальных кинетических энергий  $dE_k$  всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$K = dE_k / dm.$$

Размерность и единица кермы:

$$\dim K = L^2 T^{-2}, [K] = 1 \text{ Гр}.$$

Грей равен керме, при которой сумма начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

Керма включает в себя полную энергию вторичных заряженных частиц, в том числе и ту ее часть, которая расходуется затем на тормозное излучение. Таким образом, керма может быть представлена в виде суммы двух членов:

$$K = K_1 + K_2 = \mu_{en,m} \Phi_w + (\mu_{tr,m} - \mu_{en,m}) \Phi_w = \mu_{tr,m} \Phi_w,$$

где  $K_1$  — часть кермы, обусловленная кинетической энергией заряженных частиц, затраченной на ионизацию и возбуждение при взаимодействии (столкнове-

нии) частиц первичного излучения с атомами среды;  $K_2$  — часть кермы, обусловленная кинетической энергией заряженных частиц, затраченной на тормозное излучение;  $\mu_{en,m}$ ,  $\mu_{tr,m}$  и  $\Phi_w$  — усредненные значения по энергетическому спектру фотонного излучения в данной точке вещества массовых коэффициентов поглощения и передачи энергии излучения.

Для фотонного излучения средних энергий и легкоатомных материалов значение  $K_2$  мало. Так, для гамма-излучения кобальта-60 в воде  $K_2/K \approx 0,005$ .

В условиях энергетического равновесия между первичным и вторичным излучениями (что определяется пробегом вторичных заряженных частиц) значение кермы весьма близко к значениям поглощенной дозы. Для гамма-излучения кобальта-60 в легкоатомных материалах керма в этих условиях всего лишь на 0,5% больше значения поглощенной дозы. Составляющая воздушной кермы  $K_1$  для фотонного излучения является энергетическим эквивалентом экспозиционной дозы. Применение кермы не ограничено сверху какой-либо энергией фотонов. При выборе десятичных дольных и кратных единиц кермы необходимо в зависимости от области использования этой величины руководствоваться рекомендациями, изложенными выше для поглощенной дозы.

• Мощность кермы  $\dot{K}$  — отношение приращения кермы  $dK$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{K} = dK / dt.$$

Размерность и единица мощности кермы:

$$\dim \dot{K} = L^2 T^{-3}, [\dot{K}] = 1 \text{ Гр/с}.$$

Грей в секунду равен мощности кермы, при которой в веществе за 1 с создается керма 1 Гр.

При выборе производных единиц мощности кермы необходимо в зависимости от области использования этой величины руководствоваться рекомендациями для мощности поглощенной дозы. Предпочтительные единицы: мГр/мин; Гр/мин; мГр/с; Гр/с; кГр/с.

• Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза)  $X$  — отношение суммарного заряда  $dQ$  всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные



фотонами в элементарном объеме воздуха массой  $dm$ , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$X = dQ/dm.$$

Размерность и единица экспозиционной дозы фотонного излучения:

$$\dim X = M^{-1}TI, [X] = 1 \text{ Кл/кг}.$$

Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в воздухе массой 1 кг, производят ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

Внесистемная единица экспозиционной дозы-рентген (Р)-связана с единицей СИ этой величины следующими соотношениями:  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$  (точно);  $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$  (приблизительно).

Существенное изменение размеров единиц и коэффициента связи между внесистемными единицами и единицами СИ может быть причиной многочисленных ошибок. Поэтому в процессе перехода на единицы СИ экспозиционная доза подлежит изъятию из употребления.

\* Имея в виду постепенный отказ от практического использования экспозиционной дозы и ее мощности, во время переходного периода их значения указываются во внесистемных единицах (Р, Р/с или в соответствующих десятичных долях и кратных единицах). Значения этих величин в единицах СИ (Кл/кг, А/кг или в соответствующих десятичных долях и кратных единицах) приводить не следует. Использование экспозиционной дозы и ее мощности после 1 января 1990 г. не рекомендуется.

● Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения (мощность экспозиционной дозы)  $\dot{X}$  — отношение приращения  $dX$  экспозиционной дозы за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{X} = dX/dt.$$

Размерность и единица мощности дозы:

$$\dim \dot{X} = M^{-1}I, [\dot{X}] = 1 \text{ А/кг}.$$

Ампер на килограмм равен мощности экспозиционной дозы фотонного излучения, при которой за 1 с создается экспозиционная доза 1 Кл/кг.

Внесистемная единица мощности экспозиционной дозы рентген в секунду (Р/с) связана с единицей СИ этой величины следующими соотношениями:  $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$  (точно);  $1 \text{ А/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р/с}$  (приблизительно).

В процессе перехода на единицы СИ величина «мощность экспозиционной дозы» подлежит изъятию из употребления.

● Эквивалентная доза ионизирующего излучения (эквивалентная доза)  $H$  — произведение поглощенной дозы  $D$  на средний коэффициент качества  $k$  ионизирующего излучения в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава:

$$H = Dk.$$

Если учесть, что коэффициент  $k$  — величина безразмерная, то из этого равенства следует, что размерность  $H$  совпадает с размерностью поглощенной дозы:

$$\dim H = L^2T^{-2}, [H] = 1 \text{ Зв (зиверт)}.$$

Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг.

Эквивалентная доза ионизирующего излучения является основной величиной, определяющей уровень радиационной опасности при хроническом облучении человека в малых дозах. Предпочтительной единицей эквивалентной дозы является миллизиверт (мЗв). Допускается использование единицы микрозиверт (мкЗв). Эквивалентная доза допускается к применению при ее значениях, не превышающих 250 мЗв при облучении всего тела человека в течение года.

Средний коэффициент качества  $k$  определяется по формуле

$$k = \frac{\int_0^\infty D(L)k(L)dL}{\int_0^\infty D(L)dL},$$

где  $D(L)$  — распределение поглощенной дозы по линейной передаче энергии;  $k(L)$  — регламентированная зависимость коэффициента качества от линейной передачи энергии согласно ГОСТ 8.496—83.



В качестве биологической ткани стандартного состава принимается состав, рекомендованный МКРЕ<sup>1</sup>: O—76,2%, C—11,1, H—10,1; N—2,6%.

● Мощность эквивалентной дозы ионизирующего излучения (мощность эквивалентной дозы)  $\dot{H}$ —отношение приращения  $dH$  эквивалентной дозы за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{H} = dH/dt.$$

Размерность и единица мощности эквивалентной дозы ионизирующего излучения:

$$\dim \dot{H} = L^2 T^{-3}; [\dot{H}] = 1 \text{ Зв/с}.$$

*Зиверт в секунду* равен мощности эквивалентной дозы, при которой за 1 с создается эквивалентная доза 1 Зв.

Время пребывания человека в поле излучения при низких уровнях ионизирующего излучения измеряется, как правило, часами (шестичасовой рабочий день, 36-часовая рабочая неделя). Поэтому предпочтительной единицей для мощности эквивалентной дозы должен быть микрозиверт в час (мкЗв/ч) вне зависимости от размера величины.

\* 1. Допустимая среднегодовая мощность эквивалентной дозы при облучении всего тела работающих равна 28 мкЗв/ч при 36-часовой рабочей неделе.

2. Естественный фон на территории СССР создает мощность эквивалентной дозы, находящуюся в пределах 0,05—0,2 мкЗв/ч.

## § 11.5

### РАДИАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

● Активность радионуклида в источнике (образце) (активность радионуклида)  $A$ —отношение числа  $dN$  спонтанных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида в источнике (образце), происходящих за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

<sup>1</sup> МКРЕ—Международная комиссия по радиологическим единицам и измерениям.

Размерность и единица активности:

$$\dim A = T^{-1}, [A] = \frac{1}{1c} = 1 \text{ с}^{-1} \text{ (беккерель)}.$$

*Беккерель* равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит один спонтанный переход из определенного ядерно-энергетического состояния этого радионуклида.

Соотношение между внесистемной единицей кюри и единицей СИ—беккерелем: 1 Ки =  $3,700 \cdot 10^{10}$  Бк (точно).

Предпочтительные единицы: Бк; кБк; МБк; ГБк; ТБк; ПБк.

● Удельная активность источника  $A_m$ —отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце) к массе  $m$  источника (образца) или к массе элемента, соединения:

$$A_m = A/m.$$

Размерность и единица удельной активности источника:

$$\dim A_m = M^{-1} T^{-1}, [A_m] = 1 \text{ Бк/кг}.$$

*Беккерель на килограмм* равен удельной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике (элементе, соединении) массой 1 кг равна 1 Бк.

Это определение единицы удельной активности нуждается в пояснении.

Удельную активность радиоактивного источника (образца), например радиоактивного раствора или меченого соединения, можно выразить двумя способами. Во-первых, как отношение активности  $A$  раствора (соединения) к массе  $m_p$  всего раствора:

$$A_{v,p} = \frac{A}{m_p},$$

во-вторых, как отношение активности раствора (соединения) к массе  $m_s$  радиоактивного элемента, входящего в состав раствора (соединения):

$$A_{v,s} = A/m_s.$$

Заметим, что на практике удельная активность рассчитывается в большинстве случаев не на



килограмм (кг), а на грамм (г). Поэтому в качестве предпочтительных единиц удельной активности [54] установлены: Бк/г, кБк/г, МБк/г, ГБк/г, ТБк/г.

• Объемная активность источника  $A_v$  — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце) к его объему:

$$A_v = A/V.$$

Размерность и единица объемной активности источника:

$$\dim A_v = L^{-3}T^{-1}, [A_v] = 1 \text{ Бк/м}^3.$$

*Беккерель на кубический метр* равен объемной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике объемом  $1 \text{ м}^3$  равна 1 Бк.

Производная единица Бк/м<sup>3</sup> крайне неудобна для характеристики объемной активности радиоактивных жидкостей, выпускаемых промышленностью для применения в научных исследованиях, технике и медицине. Например, объемная активность радиофармацевтических препаратов находится в диапазоне  $0,1—100 \text{ мКи/мл}$ , что соответствует  $3,7 \cdot 10^{12}—3,7 \cdot 10^{15} \text{ Бк/м}^3$ .

Оперировать такими числовыми значениями объемной активности затруднительно. Кроме того, мерная посуда, выпускаемая промышленностью для измерения объемов радиоактивных жидкостей, калибрована не в дольных единицах СИ (кубических сантиметрах), а во внесистемных единицах (литрах и миллилитрах). Поэтому в настоящее время и до тех пор, пока калибровка мерной посуды не будет производиться в кубических сантиметрах, рекомендуется [54] использовать в качестве предпочтительных единиц объемной активности радиоактивных жидкостей следующие единицы: Бк/мл; кБк/мл; МБк/мл; кБк/л; МБк/л.

Для выражения объемной активности газов рекомендуется единица Бк/м<sup>3</sup>. Для примера укажем, что допустимая концентрация радионуклидов в воздухе лежит в диапазоне  $10^{-17}—10^{-8} \text{ Ки/л}$ , что соответствует в СИ значениям  $10^{-4}—10^5 \text{ Бк/м}^3$ .

• Молярная активность источника  $A_m$  — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце) к числу молей  $n$  вещества (соединения), содержащего данный радионуклид:

$$A_m = A/n.$$

Размерность и единица молярной активности источника:

$$\dim A_m = T^{-1}N^{-1}, [A_m] = 1 \text{ Бк/моль}.$$

*Беккерель на моль* равен молярной активности, при которой в источнике (соединении), содержащем 1 моль радиоактивного вещества (соединения), активность равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: МБк/моль; ГБк/моль; МБк/ммоль; ГБк/ммоль; ТБк/ммоль.

• Поверхностная активность источника  $A_s$  — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце), распределенной на поверхности источника, к площади  $S$  этой поверхности:

$$A_s = A/S.$$

Размерность и единица поверхностной активности источника:

$$\dim A_s = L^{-2}T^{-1}, [A_s] = 1 \text{ Бк/м}^2.$$

*Беккерель на квадратный метр* равен поверхностной активности, при которой активность радионуклида (радионуклидов), распределенного на поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ , равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/см<sup>2</sup>, кБк/см<sup>2</sup>, МБк/см<sup>2</sup>, ГБк/см<sup>2</sup>.

• Постоянная мощности воздушной кермы радионуклида (керма-постоянная)  $\Gamma_s$  — отношение мощности воздушной кермы  $\dot{K}_s$ , создаваемой фотонами с энергией, большей заданного порогового значения  $\delta$ , от точечного изотропно излучающего источника данного радионуклида, находящегося в вакууме на расстоянии  $l$  от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности  $A$  источника:

$$\Gamma_s = \dot{K}_s l^2 / A.$$

Размерность и единица постоянной мощности воздушной кермы радионуклида:

$$\dim \Gamma_s = L^4T^{-2}, [\Gamma_s] = 1 \text{ Гр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк}).$$

*Грей-метр в квадрате на секунду-беккерель* равен постоянной мощности воздушной кермы радионуклида, при которой мощность воздушной кермы, создаваемой фотонным излучением с энергией, большей  $\delta$ , от точечного изотропно излучающего



источника активностью 1 Бк в вакууме на расстоянии 1 м, равна 1 Гр/с.

Предпочтительная единица:  $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$ .

\* Постоянная мощности воздушной кермы радионуклида вводится вместо широко использовавшейся ранее гамма-постоянной (постоянной мощности экспозиционной дозы), которая выражалась во внесистемных единицах — рентген-квадратный сантиметр на час-милликури  $[\text{Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мКи})]$ . Постоянная мощности воздушной кермы, выраженная в аттогрей-квадратных метрах на секунду-беккерель  $\left[ \frac{\text{аГр} \cdot \text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{Бк}} \right]$ , практически численно равна постоянной мощности экспозиционной дозы данного радионуклида, выраженной в  $\left[ \frac{\text{Р} \cdot \text{см}^2}{\text{с} \cdot \text{Бк}} \right]$  и умноженной на 6,55. Ограничение со стороны низких энергий ( $\delta$ ) введено для того, чтобы можно было пренебречь поглощением гамма-излучения в источнике и в воздухе. Выражается в  $\delta$ -килоэлектрон-вольтах, например  $\Gamma_{30}$ ,  $\Gamma_{50}$  и т. д.

● Керма-эквивалент источника  $K_e$  — мощность воздушной кермы фотонного излучения с энергией фотонов, большей заданного порогового значения  $\delta$ , от точечного изотропно излучающего источника, находящегося в вакууме на расстоянии  $l$  от источника, умноженная на квадрат этого расстояния:

$$K_e = Kl^2.$$

Размерность и единица кермы эквивалента источника:

$$\dim K_e = L^4 T^{-3}, [K_e] = 1 \text{ Гр} \cdot \text{м}^2 / \text{с}.$$

Грей-метр в квадрате в секунду равен керма-эквиваленту источника, при котором точечный изотропно излучающий источник фотонов с энергией фотонов, большей  $\delta$ , создает в вакууме на расстоянии 1 м мощность воздушной кермы 1 Гр/с.

Предпочтительные единицы:  $\text{нГр} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ ;  $\text{мкГр} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ ;  $\text{мГр} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ ;  $\text{Гр} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ .

\* Керма-эквивалент источника вводится вместо широко использовавшегося на практике гамма-эквивалента с внесистемной единицей миллиграмм-эквивалент радия (мг-экв Ra). Керма-эквивалент источника, выраженный в  $\text{нГр} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ , численно в 2,0 (приблизленно) больше гамма-эквивалента этого источника, выраженного в мг-экв Ra.

Керма-эквивалент объемного источника равен сумме керма-эквивалентов составляющих его точечных источников.

● Постоянная радиоактивного распада радионуклида  $\lambda$  — отношение доли ядер  $dN/N$  радионуклида,

распадающихся за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$\lambda = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt}.$$

Размерность и единица постоянной радиоактивного распада радионуклида:

$$\dim \lambda = T^{-1}, [\lambda] = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Секунда в минус первой степени равна постоянной распада, при которой за 1 с число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в  $e$  раз.

Предпочтительные единицы:  $\text{с}^{-1}$ ;  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\text{ч}^{-1}$ ;  $\text{сут}^{-1}$ ;  $\text{год}^{-1}$ .

● Средняя продолжительность жизни радионуклида  $\tau$  — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в  $e$  раз.

Размерность и единица средней продолжительности жизни радионуклида:

$$\dim \tau = T, [\tau] = 1 \text{ с}.$$

Предпочтительные единицы: с; мин; ч; сут; год.



### ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

#### § 12.1

#### КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Квантовая механика (волновая механика) — теория, устанавливающая способ описания и законы движения микрочастиц (элементарных частиц, атомов, молекул, атомных ядер) и их систем (например, кристаллов), а также связь величин, характеризующих частицы и системы, с физическими величинами, непосредственно измеряемыми на опыте.

#### Основные понятия<sup>1</sup>

- Автоионизация — спонтанный переход в многоэлектронной системе, сопровождающийся отрывом от нее электрона.
- Адиабатическое возмущение — изменение гамильтониана, происходящее за время, большое по сравнению с характерным временем изменения волновой функции исходного состояния.
- Адиабатическое приближение (приближение Борна — Оппенгеймера) — метод расчета систем, состоящих из частиц большой и малой масс, в котором рассматривается движение частиц малой массы в поле заданной конфигурации тяжелых частиц (большой массы).
- Азимутальная асимметрия рассеяния — отношение разности сечений рассеяния влево и вправо на одинаковые углы в одной плоскости к сумме тех же сечений.

<sup>1</sup> Терминология понятий квантовой механики и их определения соответствуют [60]. В целях удобства использования понятия расположены в алфавитном порядке.

- Амплитуда упругого рассеяния — элементы матрицы амплитуд для канала упругого рассеяния.

\* Аналогично определяется «амплитуда рассеяния».

- Ассоциативная ионизация — вылет электрона при рекомбинации двух атомов или молекул.
- Атомный остаток (атомный остов) — часть атома, остающаяся при исключении электронов, находящихся на внешних оболочках.
- Атомный форм-фактор — Фурье-образ пространственной плотности атомных электронов.
- Бозоны — частицы, для которых состояние квантовой системы, содержащей несколько тождественных частиц данного типа, описывается вектором состояния (матрицей плотности), симметричным (т. е. неизменным) относительно любых перестановок этих частиц.

\* 1. Известны бозоны разных типов: фотоны,  $\pi$ -мезоны,  $\alpha$ -частицы и т. д.

2. Все бозоны имеют целый спин; этот факт доказывается в релятивистской квантовой теории поля исходя из общих принципов.

3. Система бозонов данного типа подчиняется статистике Бозе — Эйнштейна; в данном квантовом состоянии может находиться произвольное число частиц.

- Борновское приближение — приближение для элементов матрицы амплитуд переходов, в котором они малы и представляются матричными элементами возмущения относительно невозмущенных функций.
- Вероятность перехода — вероятность обнаружения квантовой системы в некотором определенном квантовом состоянии в результате эволюции системы, если первоначально система находилась в некотором другом определенном состоянии.
- Вибронное взаимодействие — взаимодействие электронного движения с колебательным движением ядер.
- Виртуальное состояние — состояние квантовой системы, используемое в качестве одного из промежуточных при рассмотрении реакции методами теории возмущений.

\* Виртуальное состояние может отличаться от начального и конечного энергией или числом частиц.

- Внезапное возмущение — изменение гамильтониана, происходящее за время, малое по сравнению с характерным временем изменения волновой функции исходного состояния.



\* Внезапное возмущение иногда называют «встряхиванием».

• Возбужденное состояние — любое состояние квантовой системы, отличное от основного.

• Волновая функция — вектор состояния в определенном представлении (например,  $\Psi(x)$  — в координатном представлении,  $\Psi(p) = \int e^{ipx} \Psi(x) dx$  — в импульсном).

• Вторичное квантование (представление вторичного квантования; представление чисел заполнения) — реализация гильбертова пространства состояний системы многих частиц как пространства функций от числа частиц с заданными квантовыми числами.

\* 1. В этом представлении диагональными являются операторы числа частиц с заданными квантовыми числами.

2. Формально оно сводится к замене одночастичной волновой функции (например, в  $x$ - или  $p$ -представлении) на операторы рождения и уничтожения частиц в состоянии, описываемом этой волновой функцией; операторы рождения и уничтожения (для бозонов и фермионов) подчиняются соответственно бозевским или фермиевским соотношениям коммутации.

• Выврождение уровня — ситуация, когда данному энергетическому уровню отвечает несколько различных состояний.

• Выстроенность пучка — тензор, равный среднему квадратурному моменту частиц пучка, отнесенному к максимальному значению модуля одного из диагональных элементов.

\* Аналогично определяется «выстроенность мишени».

• Гамильтониан — оператор полной энергии квантовой системы.

• Гауссова орбиталь — одноцентровая орбиталь вида

$$x^k y^l z^m e^{-\xi r^2},$$

где  $k$ ,  $l$  и  $m$  — неотрицательные числа,  $\xi$  — параметр.

\* Гауссова орбиталь используется при расчетах молекул в качестве базисной функции для построения молекулярных орбиталей.

• Гибридная орбиталь — линейная комбинация атомных орбиталей с одним и тем же главным квантовым числом, учитывающая симметрию поля других атомов молекулы или кристалла.

• Детальное равновесие — равенство сечений, деленных на элементы объема фазовых пространств конечных состояний, для прямой и обратной реакции при определенной поляризации частиц.

• Диаграмма Далитца — область фазового пространства трех частиц, остающаяся после факторизации его по области изменения углов Эйлера.

• Дифференциальное сечение канала реакции — отношение вероятности перехода системы в единицу времени в элемент фазового пространства открытого канала реакции к плотности потока падающих частиц.

\* 1. Для  $N$ -частиц в конечном состоянии телесный угол канала имеет размерность  $3N-4$ .

2. Полное сечение есть интеграл от дифференциального по полному телесному углу.

• Длина рассеяния — постоянная  $a$ , определяющая свободный член в формуле для фазы рассеяния  $\delta$  при малых волновых числах  $k$ :

$$k \operatorname{ctg} \delta = -1/a + 1/2 k^2 r_0.$$

\* Постоянная  $r_0$ , входящая во второе слагаемое, называется эффективным радиусом взаимодействия.

• Дополнительность — возможность полного описания квантовой системы посредством различных взаимоисключающих полных наборов, наблюдаемых, например, в координатном или импульсном представлении.

• Дырка — незанятое состояние в электронной оболочке атома или молекулы.

• Заполненная оболочка (замкнутая оболочка) — электронная оболочка, в которой все состояния заняты.

• Зеемановское расщепление уровня — снятие вырождения атомного уровня энергии, вызываемое внешним магнитным полем.

• Изотопическое смещение — относительное смещение атомных уровней энергии в атомах нескольких различных изотопов, обусловленное различием ядер атомов.

• Интеграл перекрытия — скалярное произведение двух векторов пространства состояний.

\* В квантовой механике молекул применяется термин «интеграл перекрывания».

•  $JJ$ -связь — схема построения волновых функций атомных состояний, где состояния отдельных атомных электронов характеризуются полными угловыми моментами  $j$ , которые затем складываются в полный угловой момент атома  $J$ .



• Канал реакции — одно из возможных конечных состояний системы, различающихся видом, числом или возбуждением частиц (при заданном составе начальных частиц).

• Каноническое квантование — квантование, отвечающее каноническому (гамильтонову) формализму классического описания, при котором для обобщенной координаты  $x$  и сопряженного ей импульса  $p$  коммутационное соотношение имеет вид

$$[px] = -i\hbar,$$

а все остальные коммутаторы координат и импульсов равны нулю.

• Квазиклассическое приближение — метод нахождения волновых функций и уровней энергии путем разложения их по степеням отношения длин дебройлевских волн частиц к характерным размерам системы.

• Квазистационарное состояние — состояние, не являющееся стационарным, но проявляющее свойства стационарного состояния в течение достаточно малых интервалов времени.

• Квантование — построение квантово-механического описания физической системы, отвечающего данному классическому, состоящее в том, что динамическим переменным системы сопоставляются операторы в некотором пространстве состояний, подчиняющиеся определенным коммутационным соотношениям.

• Квантовые числа — числа, через которые выражаются возможные значения наблюдаемых.

\* Термин «квантовые числа» употребляется преимущественно по отношению к дискретному спектру наблюдаемых.

• Классическая точка поворота — точка, разделяющая классически доступную и классически недоступную области одномерного движения системы.

• Клетка фазового пространства (ячейка фазового пространства) — часть фазового пространства системы, имеющая объем, равный  $(2\pi\hbar)^v$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка,  $v$  — число степеней свободы системы.

• Контактное взаимодействие — сферически-симметричная часть сверхтонкого взаимодействия электронного и ядерного магнитных моментов.

• Кулоновский молекулярный интеграл — двухэлектронный молекулярный интеграл вида

$$\int r_{1,2}^{-1} \phi_i^2(1) \phi_j^2(2) d\tau_1 d\tau_2,$$

где  $\phi_i$  и  $\phi_j$  — молекулярные орбитали.

\* В методе валентных схем под кулоновским молекулярным интегралом понимается диагональный матричный элемент эффективного одноэлектронного молекулярного гамильтониана в базисе атомных орбиталей.

•  $LS$ -связь (связь Рассела — Саундерса) — схема построения волновых функций атомных состояний, основанная на представлении, что орбитальные моменты атомных электронов складываются в орбитальный момент атома  $L$ , а их спиновые моменты — в спин атома  $S$ , которые и взаимодействуют между собой.

• Лэмбовский сдвиг — смещение атомного уровня энергии, обусловленное взаимодействием атомных электронов с электромагнитным и электрон-позитронным вакуумом.

• Лямбда-удвоение — расщепление электронных термов линейной молекулы в результате ровибронного и спин-орбитального взаимодействий.

• Магنون — квазичастица, описывающая коллективные колебания магнитных моментов атомов в магнитоупорядоченных средах, металлах, ферми-жидкостях.

• Матрица амплитуд переходов (матрица амплитуд,  $M$ -матрица), — матрица, с помощью которой дифференциальное сечение перехода в канал  $b$  из начального состояния  $a$  находится в виде

$$d\delta_{ab} = |M_{ab}|^2 d\Omega_b,$$

где  $d\Omega_b$  — элемент телесного угла канала  $b$ .

\* Для перехода системы двух частиц в две частицы элементы матрицы амплитуд переходов получаются из элементов  $M$ -матрицы по формуле

$$M_{ab} = (S_{ab} - \delta_{ab}) / (2i\sqrt{k_a k_b}),$$

где  $\delta_{ab}$  — элементы единичной матрицы, а  $k_a, k_b$  — волновые числа начального и конечного состояний.

• Матрица плотности — положительно определенный самосопряженный оператор  $\rho$ , удовлетворяющий условию

$$Sp \rho^2 \leq Sp \rho = 1.$$

\* Среднее значение любой наблюдаемой  $a$  определяется формулой

$$\langle a \rangle = Zp \rho a.$$



● Матрица рассеяния ( $S$ -матрица) — унитарный оператор, действие которого на асимптотически удаленную расходящуюся часть волны начального состояния, нормированной на единичный поток, дает асимптотически удаленные расходящиеся волны всех возможных каналов реакции.

\* Если парциальные волны нормированы на единичный поток, то диагональные элементы  $S$ -матрицы равны  $\exp(2i\delta_e)$ , где  $\delta_e$  — фазы рассеяния.

● Метод валентных схем (метод валентных связей) — метод расчета приближенной волновой функции, отвечающей заданной электронной конфигурации, на основе специальной схемы идеального спаривания, используемой для конструирования спиновой части этой функции.

● Метод молекулярных орбиталей — метод расчета электронных состояний молекул, в которых многоэлектронная волновая функция составляется из произведений молекулярных орбиталей и соответствует определенной конфигурации.

● Метод самосогласованного поля — метод расчета многочастичной системы, в котором взаимодействие каждой частицы системы с остальными учитывается в виде потенциальной энергии, получающейся усреднением взаимодействия по состояниям остальных частиц.

\* Если усреднение взаимодействия производится с волновой функцией, являющейся произведением волновых функций частиц системы, то метод называется *методом Хартри*, если усреднение взаимодействия производится с волновой функцией, являющейся антисимметризованной комбинацией произведений волновых функций частиц системы, то метод называется *методом Хартри — Фока*.

● Многоканальное рассеяние (многоканальная реакция) — рассеяние с более чем одним каналом реакции.

● Молекулярная орбиталь — орбиталь, являющаяся решением модельного одноэлектронного уравнения Шредингера для электрона в поле молекулярного остова.

● Молекулярный интеграл — матричный элемент одного из слагаемых электронного гамильтониана молекулы в базисе молекулярных или атомных орбиталей.

\* Молекулярные интегралы подразделяются на одноэлектронные (для оператора кинетической энергии электрона и для потенциала

взаимодействия электрона с ядрами) и на двухэлектронные (для оператора межэлектронного взаимодействия).

● Молекулярный остов — система из фиксированных ядер и распределенных в пространстве с заданной плотностью электронов, создающая эффективный потенциал, в котором движутся выделенные электроны молекулы.

● Мультиплет — совокупность уровней энергии электронных состояний атома с данными значениями орбитального момента  $L$  и спина  $S$ , различающихся значениями полного момента  $J$ , допустимыми при данных  $L$  и  $S$ .

● Мультиплетность — число  $2s + 1$ , совпадающее при  $L \geq S$  с числом компонент данного мультиплета.

● Наблюдаемая — принципиально наблюдаемая физическая величина (координата, импульс, энергия, угловой момент, спин и т. д.), которой в пространстве состояний сопоставляется некоторый самосопряженный оператор (оператор этой наблюдаемой).

● Нулевое дифференциальное перекрывание — метод построения приближенной волновой функции молекулы, согласно которому базисные функции, выбранные в форме атомных орбиталей, удовлетворяют соотношению  $\chi_\alpha^*(\vec{r}) \chi_\beta(\vec{r}) = 0$ , если индексы  $\alpha \neq \beta$  относятся к функциям, центрированным на различных ядрах.

● Обменный молекулярный интеграл — двухэлектронный молекулярный интеграл вида

$$\int r_{1,2}^{-1} \varphi_i(1) \varphi_j(1) \varphi_i(2) \varphi_j(2) d\tau_{1,2},$$

где  $\varphi_i$  и  $\varphi_j$  — атомные или молекулярные орбитали.

\* В методе валентных схем под обменным молекулярным интегралом понимается недиагональный матричный элемент эффективного двухэлектронного гамильтониана в базисе атомных орбиталей.

● Оже-переход — безызлучательный переход, при котором энергия, освобождающаяся при внутриатомном переходе одного электрона, расходуется на вырывание из атома другого электрона.

● Орбиталь — функция пространственных переменных одного электрона, имеющая смысл волновой функции отдельного электрона в поле эффективного атомного или молекулярного остова.

● Основное состояние — состояние квантовой системы, отвечающее наименьшему значению энергии.



- Особенности Ван Хова — особенности плотности состояний квазичастиц, связанные с обращением в нуль их групповой скорости в некоторых критических точках зоны Бриллюэна.
- Ось антиферромагнетизма — направление, вдоль и против которого ориентируются намагниченности подрешеток в антиферромагнетике с коллинеарной или слабонеколлинеарной магнитной структурой.
- Открытый канал реакции — канал реакции, вероятность перехода в который не равна нулю.
- Отталкивание уровней энергии (правило непересечения) — невозможность совпадения уровней энергии двух состояний одинаковой симметрии для системы с гамильтонианом, зависящим от параметра, при изменении этого параметра.
- Парциальная амплитуда — амплитуда рассеяния для определенной парциальной волны.
- Парциальная волна — волновая функция несвязанного состояния относительного движения частицы с определенными значениями энергии, углового момента и четности.
- Парциальная ширина канала — произведение постоянной Планка на вероятность перехода системы в данный канал за единицу времени.
- Перестановка частиц — переход к другой нумерации тождественных частиц, входящих в данную систему, и соответствующее преобразование вектора состояния системы.
- Переходный комплекс (переходное состояние) — состояние молекулы, отвечающее седловой точке электронного терма.
- Поле лигандов — поле атомов или молекул, которые находятся в ближайшем окружении рассматриваемого центра, как правило, атома или иона металла в кристалле или комплексном соединении.
- Полная ширина уровня — сумма всех парциальных ширин каналов реакции распада данного уровня.
- Полное сечение канала реакций (полное эффективное сечение) — отношение вероятности перехода системы в единицу времени в открытый канал реакции к плотности потока падающих частиц.
- Полный набор наблюдаемых — максимальный набор независимых физических величин, исчерпывающе характеризующий состояние системы, когда операторы

соответствующих наблюдаемых коммутируют и их совместный спектр не вырожден.

- Полный угловой момент атома — угловой момент атома, складывающийся из орбитального момента атома и его спина.
- Поляризация пучка — псевдовектор, равный среднему спиновому моменту частиц пучка, отнесенному к модулю его максимально возможного значения.
- \* Аналогично определяется «поляризация мишени».
- Порог канала реакции — наименьшая энергия системы, при которой данный канал реакции открыт.
- Потенциальный барьер — потенциал в некоторой области конфигурационного пространства, делающий эту область недоступной, согласно классическому описанию, для данной системы (частицы) при заданной энергии.
- Потенциальная поверхность (нрк. электронный терм) — собственное значение электронного гамильтониана молекулы в адиабатическом приближении как функция межъядерных расстояний.
- Правила отбора — правила, определяющие возможность квантовых переходов между определенными состояниями квантовой системы под влиянием данного возмущения в рассматриваемом приближении и указывающие те матричные элементы, которые равны нулю.
- Предиссоциация — безызлучательный электронный переход возбужденной молекулы из связанного в несвязанное состояние.
- Представление — реализация пространства состояний как пространства функций на спектре некоторого полного набора наблюдаемых.

\* 1. Если пространство состояний понимается как абстрактное гильбертово пространство, то представление есть выбор в качестве базиса собственных векторов некоторого полного набора наблюдаемых и описание векторов состояния через координаты в этом базисе.

2. Представление именуется по названию соответствующего полного набора наблюдаемых: координатное представление, импульсное представление и т. д.

3. Операторы наблюдаемых из полного набора в своем представлении диагональны, т. е. действуют как операторы умножения.

- Представление взаимодействия (картина взаимодействия; картина Дирака; смешанное представление) — описание временной эволюции квантовой системы, при котором зависимость от времени



операторов наблюдаемых определяется гамильтонианом невзаимодействующих частей системы, а зависимость от времени вектора состояния определяется гамильтонианом взаимодействия этих частей.

- Представление Гейзенберга (картина Гейзенберга) — описание временной эволюции квантовой системы в пространстве состояний, при котором вектор состояния не зависит от времени, а зависимость от времени операторов наблюдаемых определяется уравнением Гейзенберга.

- Представление конфигурационного взаимодействия (конфигурационное взаимодействие) — представление волновой функции многоэлектронной системы в виде линейной комбинации функций, отвечающих определенным электронным конфигурациям.

- Представление Шредингера (картина Шредингера) — описание временной эволюции квантовой системы, при котором операторы любых наблюдаемых не зависят от времени; зависимость от времени вектора состояния определяется уравнением Шредингера.

- Приближение молекулярных орбиталей в форме линейной комбинации атомных орбиталей (МОЛКАО) — приближение, в котором молекулярная орбиталь представляется в виде линейной комбинации атомных орбиталей, центрированных на отдельных ядрах молекулы.

- Принцип соответствия — принцип, состоящий в том, что в пределе больших квантовых чисел наблюдаемые должны переходить в соответствующие классические величины, а квантовые уравнения движения — в классические уравнения; формально этот переход отвечает пределу  $\hbar \rightarrow 0$ .

- Принцип суперпозиции — принцип, состоящий в том, что если некоторые два состояния квантовой системы описываются в пространстве состояний соответственно векторами  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ , то вектор  $\Psi = \lambda_1 \Psi_1 + \lambda_2 \Psi_2$ , где  $\lambda_1, \lambda_2$  — произвольные комплексные числа ( $|\lambda_1|^2 + |\lambda_2|^2 \neq 0$ ) также описывает некоторое возможное состояние той же системы.

- Пространство состояний — гильбертово пространство, в котором любое состояние данной квантовой системы может быть представлено либо вектором, либо матрицей плотности.

\* 1. Состояние, описываемое вектором, называется чистым состоянием; соответствующий вектор называется вектором состояния (векторы, отличающиеся ненулевым постоянным комплексным множителем, описывают одно и то же состояние).

2. Состояние, описываемое матрицей плотности, называется смешанным состоянием; частный случай смешанного состояния, когда матрица плотности вырождается в проекционный оператор на некоторый вектор, отвечает чистому состоянию.

- Разрешенная энергетическая зона — интервал энергий, заполненный собственными значениями энергии квазичастицы в кристалле.

- Разрыхляющая орбиталь — молекулярная орбиталь, для которой энергия соответствующего одноэлектронного состояния при переходе к системе разъединенных атомов (или фрагментов молекулы) понижается.

- Ровибронное взаимодействие — взаимодействие электронного движения с колебательным и вращательным движением ядер.

- Сверхтонкая структура — снятие вырождения атомного уровня энергии, обусловленное взаимодействием атомных электронов с магнитным моментом атомного ядра.

- Связывающая орбиталь — молекулярная орбиталь, для которой энергия соответствующего одноэлектронного состояния при переходе к системе разъединенных атомов (или фрагментов молекулы) повышается.

- Слейтеровская орбиталь — одноцентровая орбиталь вида

$$r^n e^{-\zeta r} Y_{l,m}(\nu, \varphi),$$

где  $Y_{l,m}$  — сферические функции.

\* Слейтеровская орбиталь используется в качестве базисной функции при расчетах атомов и молекул.

- Случайное вырождение — вырождение уровня энергии системы, не обусловленное ее симметрией в трехмерном координатном пространстве.

- Снятие вырождения — расщепление вырожденного энергетического уровня под влиянием возмущения.

- Спектр наблюдаемой — множество значений наблюдаемой, которыми может обладать данная физическая система, совпадающее со спектром соответствующего оператора наблюдаемой.

\* Состояние, в котором некоторая наблюдаемая имеет строго определенное значение, называется собственным состоянием наблюдаемой; оно описывается соответствующим собственным вектором оператора этой наблюдаемой.



- Спин атома — суммарный спин всех атомных электронов.

- Спин частицы — угловой момент покоящейся частицы.

\* Термин применяется также к атомным ядрам, рассматриваемым как целое.

- Спин-орбиталь — функция пространственных и спиновых переменных одного электрона, имеющая смысл волновой функции отдельного электрона в поле эффективности атомного или молекулярного остова.

- Спин-орбитальное взаимодействие — взаимодействие спина частицы с полем, обусловленным ее орбитальным движением.

- Спин-спиновое взаимодействие — взаимодействие между спинами частиц системы.

- Статистическая модель атома (модель Томаса — Ферми) — модель атома, в которой атомные электроны рассматриваются как вырожденный электронный газ.

- Стационарное состояние — состояние квантовой системы, описываемое собственным вектором гамильтониана, не зависящего от времени.

- Тонкая структура — снятие вырождения атомного уровня энергии, расщепляющегося под действием релятивистских эффектов на ряд уровней с различными значениями полного момента  $J$ , возможными при данных  $L$  и  $S$ .

- Туннельный эффект — эффект проникновения квантовой системы (частицы) через область потенциального барьера, разделяющего две классические доступные области.

- Упругое рассеяние (канал упругого рассеяния) — канал реакции, в котором вид, внутреннее состояние и число частиц совпадают с исходными.

- Фаза рассеяния (фазовый сдвиг) — изменение фазы парциальной волны в результате упругого рассеяния.

\* Если происходит только упругое рассеяние, фазы действительны; в случае многоканального рассеяния фазы имеют положительную мнимую часть.

- Фазовое пространство канала реакции (компактное фазовое пространство) — подпространство, выделяемое в пространстве всех импульсов частиц конечного состояния канала реакции условиями сохранения энергии и импульса в реакции.

- Фазовый анализ — определение фаз рассеяния по экспериментальным данным.

- Фазовый объем — объем фазового пространства конечного состояния канала реакции.

- Хорошее квантовое число — квантовое число, позволяющее характеризовать волновую функцию данного приближения, если поправки следующего приближения к ней, пропорциональные волновым функциям с другими значениями этого квантового числа, численно малы.

- Четность — наблюдаемая, не имеющая классического аналога и определяющая изменение вектора состояния квантовой системы при инверсии пространственных координат.

- Штарковское расщепление — снятие вырождения атомного уровня энергии, вызываемое внешним электрическим полем.

- Эквивалентные элементы — атомные электроны, находящиеся на одной электронной оболочке.

- Электронная конфигурация — распределение электронов по атомным или молекулярным орбиталям; определяется указанием занятых орбиталей и соответствующих им чисел заполнения.

- Электронные конфигурации атома — распределение атомных электронов по электронным оболочкам.

- Электронная оболочка — совокупность одноэлектронных состояний в атоме, имеющих определенные значения квантовых чисел  $n$  и  $l$  и возникающих при описании атома в приближении самосогласованного поля.

- Электронный слой — совокупность одноэлектронных оболочек, имеющих определенное значение квантового числа  $n$ .

- Электронный терм — разность энергий равновесных конфигураций молекулы в возбужденном и основном состояниях.

- Энергетический уровень — возможное значение полной энергии консервативной квантовой системы. Иначе: собственное значение гамильтониана, не зависящего от времени.

- Энергия диссоциации — минимальная энергия, необходимая для диссоциации молекул по данному каналу.

\* Энергия диссоциации, отсчитываемая от минимума потенциальной поверхности данного состояния, обозначается  $D_e$ , а от низшего колебательного уровня —  $D_0$ .



- Энергия ионизации атома — минимальная энергия, необходимая для удаления одного электрона из нейтрального атома.
- Энергия связи электрона — минимальная энергия, необходимая для удаления из атома электрона, находящегося в данном состоянии.
- Ядерное спин-спиновое взаимодействие — взаимодействие ядерных магнитных моментов, как непосредственное, так и обусловленное их взаимодействием с электронной оболочкой молекулы.

## § 12.2

### КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Квантовая теория твердого тела — это современная теория кристаллического вещества, а также теория неупорядоченных систем, связанные со все более глубоким проникновением квантовых понятий и представлений в физическую науку о структуре и свойствах конденсированных систем.

Ниже приводятся основные понятия квантовой теории твердого тела и их определения<sup>1</sup>.

- Акустические колебания — колебания кристаллической решетки, частота которых в длинноволновом пределе линейно зависит от волнового вектора; в сложном кристалле — это колебание элементарной ячейки как целого.

- Акцепторные уровни — энергетические уровни локализованных состояний электронов, заполнение которых приводит к появлению дырок в валентной зоне.

- Ангармонизм колебаний — свойство колебаний, обусловленное их отклонением от гармонического.

\* Под гармоническим колебанием здесь понимается колебание, которое происходит под действием возвращающей силы, линейной по смещению.

- Антиферромагнетизм — явление упорядочения магнитных моментов атомов в твердом теле, приводящее к тому, что твердое тело в отсутствие внешнего магнитного поля оказывается ненамагниченным.

- Бесщелевая сверхпроводимость — явление, имеющее место в сверхпроводниках либо вблизи крити-

ческого поля, либо при наличии магнитных примесей вблизи критической концентрации, когда отсутствует щель в спектре возбуждений, но параметр порядка отличен от нуля.

- Бесщелевой полупроводник — полупроводник с нулевой (или очень малой) запрещенной зоной, отделяющей зону проводимости от валентной.

- Ближний магнитный порядок — взаимная ориентация спиновых магнитных моментов атомов или ионов, находящихся в окрестности данного узла кристаллической решетки.

- Бозе-газ — идеальный газ частиц (квазичастиц), описываемых статистикой Бозе — Эйнштейна.

- Вакансон — квазичастица, переносящая вакансию по узлам кристаллической решетки.

- Валентная зона — энергетическая область разрешенных электронных состояний в твердом теле; при абсолютном нуле температуры целиком заполнена валентными электронами.

- Верхнее критическое поле — значение магнитной индукции поля, при котором массивный образец сверхпроводника II рода переходит из смешанного состояния в нормальное.

- Вибронный эффект в молекулярных кристаллах — существование в молекулярных кристаллах квазинепрерывных полос поглощения, обусловленных одновременно возникновению экситонов и фононов внутримолекулярных колебаний.

- Второй звук в кристалле — колебания локальной температуры кристаллов, связанные с изменением плотности энергии и плотности импульса в фононном газе.

- Газ квазичастиц — система слабовзаимодействующих квазичастиц.

- Гейзенберга модель — квантово-механическая модель ферро- и антиферромагнетизма непроводящих твердых тел, в которой предполагается, что атомные магнитные моменты локализованы в узлах кристаллической решетки и ферро- или антиферромагнитное упорядочение этих моментов обусловлено обменным взаимодействием между атомами.

- Геликоидальная магнитная структура — магнитная структура, характеризующаяся тем, что магнитные моменты атомов, находящихся на определенной кристаллографической оси, повернуты относительно друг друга на некоторый угол и концы их описывают

<sup>1</sup> Терминология понятий квантовой теории твердого тела и их определения соответствуют [61].



в пространстве винтовую линию (геликоид) вокруг указанной оси (ось геликоида).

- Глубина проникновения магнитного поля — расстояние от границы сверхпроводника, на котором существенно убывает внешнее магнитное поле.

- Горячие носители — электроны (дырки) полупроводника, средняя кинетическая энергия которых во внешнем электрическом поле превышает среднюю тепловую ( $kT$ ).

- Групповая скорость — квантово-механическая скорость квазичастицы, равная

$$v = \frac{1}{\hbar} \frac{d\varepsilon}{dk},$$

где  $\varepsilon$  — энергия квазичастицы,  $k$  — квазиимпульс.

- Дальний магнитный порядок — взаимная ориентация спиновых магнитных моментов атомов или ионов в кристалле на макроскопических расстояниях.

- Дефектон — квазичастица, переносящая точечный дефект.

- Диамагнетизм — явление возникновения в веществе намагниченности в направлении, противоположном внешнему магнитному полю.

- Диамагнетизм Ландау — диамагнетизм, обусловленный квантованием энергии орбитального движения электронов проводимости в магнитном поле.

- Дисперсионные соотношения — интегральные соотношения между действительной и мнимой частями восприимчивости, диэлектрической проницаемости, амплитуды рассеяния и т. д.

- Диэлектрик — твердое тело с низкой электропроводимостью, концентрация электронов проводимости в котором мала при всех температурах, что обусловлено большой шириной запрещенной зоны.

- Длина когерентности — расстояние, на котором существенно коррелировано движение электронов в сверхпроводнике.

- Донорные уровни — энергетические уровни локализованных состояний электронов, ионизация которых приводит к появлению электронов в зоне проводимости.

- Дырка — квазичастица с зарядом  $e$  и спином  $\hbar/2$ , возникающая при освобождении занятого состояния вырожденного ферми-распределения электронов.

- Закон дисперсии — зависимость энергии квазичастицы (или частоты волны) от квазиимпульса (или волнового вектора).

- Запрещенная энергетическая зона — интервал значений энергии между двумя ближайшими разрешенными энергетическими зонами.

- Зона проводимости — низшая по энергии разрешенная энергетическая зона, не заполненная или заполненная носителями частично при абсолютном нуле температур.

- Изинга модель — модель кристалла, в узлах которого находятся взаимодействующие магнитные моменты, принимающие только две возможные антипараллельные ориентации.

- Изотопический эффект — зависимость температуры перехода металла в сверхпроводящее состояние от изотопической массы его атомов.

- Ионная связь — связь в твердом теле, обусловленная электростатическим притяжением разноименно заряженных ионов.

- $k$ -пространство — пространство вектора квазиимпульса.

- Квазиимпульс — вектор, компоненты которого являются квантовыми числами, характеризующими состояние частицы в кристалле.

\* Квазиимпульс является обобщением понятия импульса на случай движения частицы в периодическом потенциале. Квазиимпульс определен с точностью до вектора обратной решетки.

- Квазилокальные колебания — колебания, связанные с наличием дефекта кристаллической решетки и имеющие максимум амплитуды вблизи дефекта; частота квазилокальных колебаний лежит в полосе частот идеального кристалла.

- Квазичастица (элементарное возбуждение) — распространяющееся возбуждение (волна) с определенной энергией, импульсом (квазиимпульсом) и спином.

\* Квазичастицы выступают в качестве носителей различных свойств. Совокупность квазичастиц описывает слабовозбужденное состояние физической системы.

- Квантование магнитного потока — явление, заключающееся в существовании кванта магнитного потока, равного  $\Phi_0 = \pi \hbar c / e$ .

- Квантовая диффузия — диффузия собственных дефектов (типа вакансий или примесей), происходящая посредством квантового туннелирования дефекта из одного равновесного положения в другое.

- Квантовые кристаллы — кристаллы из легких элементов (H, He), особые свойства которых



обусловлены тем, что амплитуда нулевых колебаний в них по порядку величины сравнима с периодом кристаллической решетки.

- Квантовый размерный эффект — осцилляционная зависимость термодинамических и кинетических характеристик тонких пленок твердого тела от толщины пленки, связанная с квантованием электронных уровней.
- Ковалентная связь — связь в твердом теле, обусловленная обобществлением валентных электронов ближайших соседних атомов; характеризуется выраженной направленностью.
- Критическая температура сверхпроводящего перехода — значение температуры, при котором металл переходит в сверхпроводящее состояние.
- Критический ток — значение электрического тока, при котором происходит разрушение сверхпроводящего состояния.
- Критическое поле сверхпроводника I рода — равновесное значение магнитного поля, при превышении которого сверхпроводник переходит в нормальное состояние.
- Куперовская пара — квазичастица, описывающая связанное состояние двух электронов вблизи поверхности Ферми, обусловленное эффективным межэлектронным притяжением.
- Локальные колебания — коллективные колебания атомов, расположенных вблизи дефекта кристаллической решетки; частота локальных колебаний лежит вне полосы частот идеального кристалла.
- Магنون (спиновая волна) — квазичастица, описывающая коллективные колебания магнитных моментов атомов в магнитоупорядоченных средах, металлах, ферми-жидкостях.
- Масса эффективная — тензорная величина, характеризующая инертные свойства квазичастицы; определяется из ее закона дисперсии.
- Металл — твердое тело, основные физические свойства которого определяются электронами проводимости с концентрацией порядка одного электрона на атом.
- Металлическая связь — связь, обусловленная взаимодействием электронов проводимости и ионов решетки металла.
- Многодолинный полупроводник — полупроводник, энергия электронов (дырок) которого имеет несколь-

ко минимумов (максимумов) при различных значениях квазиимпульса.

- Модель Стонера — Вольфарта — квантово-механическая модель магнетизма металлов, описывающая упорядочение спинов электронов проводимости в результате обменного взаимодействия между ними.
- Молекулярное поле Вейсса — магнитное внутреннее эффективное поле, вводимое в квантовой теории магнетизма для приближенного описания обменного взаимодействия между атомными магнитными моментами.
- Непрямые междузонные переходы — переходы электрона из валентной зоны в зону проводимости с изменением квазиимпульса электрона.
- Нижнее критическое поле — значение магнитного поля, при котором массивный образец сверхпроводника II рода начинает переходить из сверхпроводящего состояния в смешанное.
- Нулевой звук — специфические волны, которые могут распространяться в ферми-жидкости (например,  $^3\text{He}$ ) при температурах, близких к абсолютному нулю, когда не успевает устанавливаться локальное термодинамическое равновесие.
- Нулевые колебания кристалла — колебания атомов кристаллической решетки при абсолютном нуле температуры.
- Обменное взаимодействие — специфическая для квантовой механики часть электростатического взаимодействия тождественных частиц, обусловленная симметрией волновой функции относительно перестановок частиц.
- Обратная решетка — бесконечная совокупность узлов, определяемая векторами обратной решетки:

$$\mathbf{b}_n = \sum_{i=1}^3 n_i \mathbf{b}_i,$$

где  $n_i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

- Одночастичная функция Грина (функция распространения, пропагатор) — среднее значение от упорядоченного произведения двух полевых фермионных (бозонных) или других операторов, взятое по равновесному состоянию.
- Оптические колебания — колебания сложной кристаллической решетки, связанные с относительным смещением атомов в элементарной ячейке.
- Особенности Ван Хофа — особенности плотности состояний квазичастиц, связанные с обращением



в нуль их групповой скорости в некоторых критических точках зоны Бриллюэна.

- Ось антиферромагнетизма — направление, вдоль и против которого ориентируются намагниченности подрешеток в антиферромагнетике с коллинеарной или слабонеколлинеарной магнитной структурой.
- Парамагнетизм — явление возникновения в веществе в отсутствие магнитной упорядоченности слабой намагниченности в направлении магнитного поля.
- Парамагнетизм Ван-Флека — парамагнетизм, вызванный наличием асимметрии в электронных оболочках атомов и молекул.
- Парамагнетизм Паули — парамагнетизм, обусловленный спином электронов проводимости.
- Параметр порядка в теории сверхпроводимости — макроскопическая (эффективная) волновая функция сверхпроводящих электронов.
- Первая зона Бриллюэна (зона Бриллюэна) — область  $k$ -пространства, содержащая все точки, расположенные ближе к данному узлу обратной решетки, чем к любому другому; имеет форму многогранника, грани которого образованы плоскостями, проходящими через середины отрезков перпендикулярно им, соединяющих точку  $k=0$  с ближайшими узлами и иногда следующими за ними.
- Переходный металл — металл, состоящий из атомов с частично заполненными оболочками ( $d$ ,  $f$ ).
- Плазмон — квазичастица, описывающая связанные колебания электронной плотности и электромагнитного поля в плазме твердого тела.
- Плотность состояний — число состояний, приходящееся на единичный интервал энергий.
- Поверхностные уровни Тамма — электронные состояния, локализованные у поверхности кристалла.
- Подрешетка магнитная — совокупность одинаковых атомных магнитных моментов, обладающая определенной пространственной периодичностью.
- Полуметалл — твердое тело, концентрация электронов проводимости в котором определяется перекрытием энергетических зон и имеет порядок  $10^{-3}$ — $10^{-5}$  электронов на атом.
- Полупроводник — твердое тело, электропроводимость в котором мала при 0 К, но существенно увеличивается с ростом температуры из-за малой ширины запрещенной зоны и появления электронов в зоне проводимости (дырок в валентной зоне).

- Поляритон — квазичастица, описывающая связанные между собой фонон поперечных оптических колебаний и фотон, имеющие почти одинаковые энергии и волновые векторы.
- Полярон — квазичастица, описывающая автолокализованные состояния электрона в деформируемом кристалле.
- Преобразование Боголюбова — линейное преобразование операторов частиц, диагонализующее гамильтониан.
- Преобразование Гольштейна — Примакова — преобразование спиновых операторов, соответствующих большим значениям спина, через операторы вторичного квантования, подчиняющееся статистике Бозе — Эйнштейна.
- Приближение сильной связи — метод вычисления волновых функций и закона дисперсии одночастичных состояний в твердых телах, основанный на разложении волновых функций по системе локализованных орбиталей и рассматривающий кинетическую энергию в качестве возмущения.
- Приближение слабой связи — метод вычисления волновых функций и закона дисперсии одночастичных состояний в твердых телах, основанный на рассмотрении периодического потенциала решетки как возмущения.
- Примесной полупроводник — полупроводник, электронные свойства которого существенно зависят от наличия примесных атомов.
- Принцип Франка — Кондона — предположение о том, что при переходе кристалла (молекулы) из одного электронного состояния в другое под действием поля оптической волны состояния ядер атомов (ионов) не изменяются.
- Промежуточное состояние — состояние сверхпроводящего образца с чередующимися областями нормальной и сверхпроводящей фаз.
- Процессы переброса — процессы рассеяния частиц (квазичастиц), при которых изменение их квазиимпульса выводит его за пределы первой зоны Бриллюэна.
- Прямые междузонные оптические переходы — переходы электрона из валентной зоны в зону проводимости без изменения квазиимпульса электрона.
- Разрешенная энергетическая зона — интервал энергий, заполненный собственными значениями энергии квазичастицы в кристалле.



- Сверхпроводники I рода — сверхпроводники, в которых длина когерентности больше глубины проникновения внешнего магнитного поля.
- Сверхпроводники II рода — сверхпроводники, в которых длина когерентности меньше глубины проникновения внешнего магнитного поля.
- Сверхрешетки — многослойные твердотельные структуры, в которых искусственно создан дополнительный периодический потенциал с периодом, на порядок или более превышающим постоянную решетки; энергетический спектр зонного электрона при этом разбивается на дополнительную систему разрешенных и запрещенных подзон (мини-зон).
- Связанное состояние — состояние частицы, локализованное в некоторой области пространства, например в окрестности другой частицы или примесного центра.
- Сегнетоэлектрики — твердые тела, в которых при некоторой температуре происходит фазовый переход в состояние со спонтанной электрической поляризацией.
- Сегнетоэлектрики типа порядок-беспорядок — сегнетоэлектрики, возникновение поляризации в которых происходит в результате нарушения симметричной заселенности положений равновесия ионов.
- Сегнетоэлектрики типа смещения — сегнетоэлектрики, спонтанная поляризация в которых создается в результате смещения части ионов из симметричных в менее симметричные положения.
- Слабая сверхпроводимость — явление туннелирования электронов (или протекания тока) через сверхпроводящие образцы малых размеров.
- Смешанное состояние — состояние сверхпроводника II рода во внешнем магнитном поле, превышающем критическое, при котором магнитное поле проникает внутрь, сосредоточиваясь вблизи вихревых линий нормальной фазы.
- Спин-орбитальное расщепление — расщепление вырожденных одноэлектронных энергетических уровней при учете взаимодействия спина электрона с магнитным полем орбитального движения электрона в решетке.
- Спонтанное нарушение симметрии — переход системы в основное состояние, симметрия которого ниже симметрии гамильтониана.
- Температура Дебая — значение температуры, определяемое предельными частотами акустических колебаний, разграничивающих область низких и вы-

соких температур по отношению к решеточным свойствам кристалла.

- Температура компенсации — температура, при которой в процессе нагревания антипараллельно ориентированные намагниченности подрешеток в ферромагнетиках становятся равными по абсолютной величине, благодаря чему суммарная намагниченность кристалла обращается в нуль.
- Температура Кюри — значение температуры, при которой в процессе нагревания (охлаждения) исчезает (проявляется) ферромагнетизм.
- Температура Нееля — значение температуры, при которой в процессе нагревания (охлаждения) исчезает (появляется) антиферромагнетизм.
- Теория БКШ — квантово-механическая теория сверхпроводимости металлов, использующая представление о межэлектронном притяжении за счет электрон-фоонных взаимодействий.
- Трансляционная симметрия кристалла — инвариантность идеального кристалла относительно смещения всех его частиц на вектор

$$\mathbf{a}_n = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3,$$

где  $n_1, n_2, n_3$  — целые числа,  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  — элементарные векторы трансляций.

- Туннельный пробой — резкое возрастание силы электрического тока через диэлектрик (полупроводник) благодаря эффекту Зинера.
- Уровни Ландау — квантовые уровни электрона в магнитном поле, обусловленные движением электрона вокруг магнитных силовых линий.
- Ферримагнетизм — явление антипараллельной ориентации различных по величине магнитных моментов соседних атомов в твердом теле, приводящее в отдельных макроскопических областях твердого тела (доменах) к возникновению самопроизвольной намагниченности.
- Ферми-газ — идеальный газ частиц (квазичастиц), описываемых статистикой Ферми — Дирака.
- Ферми-жидкость — система сильно взаимодействующих фермионов, например электронов проводимости в металлах.
- Ферми-поверхность — поверхность в  $k$ -пространстве, отделяющая занятые одночастичные состояния электронов металла от незанятых при 0 К.



- Ферромагнетизм — явление, заключающееся в том, что отдельные макроскопические области твердого тела (домены) обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью вследствие параллельной ориентации атомных магнитных моментов в отсутствие внешнего магнитного поля.
- Фотон — квазичастица, описывающая коллективные колебания атомов в кристалле.
- Функция Блоха — волновая функция стационарных состояний частицы в периодическом потенциале кристалла, являющаяся собственной функцией оператора трансляции.
- Щель в спектре возбуждений сверхпроводника — область энергий вблизи поверхности Ферми, в которой отсутствуют элементарные возбуждения в сверхпроводниках.
- Экранировка — ослабление электрического поля заряда в твердом теле, обусловленное самосогласованным взаимодействием с электронами проводимости.
- Экситон — квазичастица, описывающая связанные между собой электрон и дырку.
- Экситон Ванье — Мотта — экситон, линейные размеры которого намного превышают межатомное расстояние.
- Экситон диамагнитный — экситон, образованный электроном и дыркой с уровнями Ландау в зоне проводимости и валентной зоне.
- Экситон Френкеля — экситон с выраженной пространственной локализацией на одном (любом) узле решетки (сильная связь).
- Экситонно-примесные комплексы — экситоны Ванье — Мотта, локализованные на примесях или дефектах решетки.
- Электрон в твердом теле — квазичастица с зарядом  $(-e)$  и спином  $(\hbar/2)$  свободного электрона. Ее масса отличается от массы свободного электрона вследствие взаимодействий с другими частицами.
- Электронная орбита в постоянном магнитном поле — линия, по которой движется электрон (в квазиклассическом приближении); в  $k$ -пространстве — это линия пересечения изоэнергетической поверхности плоскостью, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля.
- Электрон проводимости — электрон в твердом теле, энергия которого находится в зоне проводимости.

- Элементарные векторы обратной решетки — векторы, определяемые через векторы  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  элементарных трансляций кристалла соотношениями

$$\mathbf{b}_1 = (2\pi/v) [\mathbf{a}_2 \mathbf{a}_3],$$

$$\mathbf{b}_2 = (2\pi/v) [\mathbf{a}_3 \mathbf{a}_1],$$

$$\mathbf{b}_3 = (2\pi/v) [\mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2],$$

где  $v = (\mathbf{a}_1 [\mathbf{a}_2 \mathbf{a}_3])$  — объем элементарной ячейки прямой решетки.

- Энергия активации — минимальная энергия, необходимая для перехода из одного квантового состояния в другое путем преодоления разделяющего их потенциального барьера.
- Энергия связанного состояния — минимальная энергия, необходимая для разрушения связанного состояния.
- Эффект близости — явления, происходящие на границе нормального и сверхпроводящего металла, обуславливающие проникновение сверхпроводящей фазы в глубь нормального металла.
- Эффект де Гааза — Ван Альфена — осцилляционная зависимость намагниченности (восприимчивости) металла от напряженности магнитного поля, обусловленная наличием уровней Ландау.
- Эффект Зинера — туннельный переход электронов из валентной зоны в зону проводимости в сильном внешнем электрическом поле.
- Эффект Кондо — явление аномально сильного взаимодействия электронов проводимости в нормальных металлах с локализованными спинами парамагнитных примесных атомов; приводит к минимуму электросопротивления некоторых разбавленных сплавов при низких температурах.
- Эффект Майснера — Оксенфельда — явление обращения в нуль магнитной индукции в глубине массивного сверхпроводника.
- Эффект Шубникова — де Гааза — осцилляционная зависимость электросопротивления металла от напряженности магнитного поля, обусловленная наличием уровней Ландау.
- Эффективная масса — тензорная величина, характеризующая инертные свойства квазичастицы; определяется из ее закона дисперсии.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### 1. Правила образования когерентных производных единиц СИ (по ГОСТ 8.417—81)

Когерентные производные единицы Международной системы единиц, как правило, образуют при помощи простейших уравнений связи между величинами (определяющих уравнений), в которых числовые коэффициенты равны 1. Для образования производных единиц величины в уравнениях связи принимаются равными единицам СИ.

**Пример.** Единицу скорости образуют с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейно и равномерно движущейся точки:

$$v = s/t,$$

где  $v$  — скорость;  $s$  — длина пройденного пути;  $t$  — время движения точки.

Подставим в формулу вместо  $s$  и  $t$  единицы СИ:

$$v = 1\text{ м}/1\text{ с} = 1\text{ м/с}.$$

Следовательно, единицей скорости является метр в секунду.

*Метр в секунду* равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Если уравнение связи содержит числовой коэффициент, отличный от 1, то для образования когерентной производной единицы СИ в правую часть подставляют величины со значениями в единицах СИ, дающими после умножения на коэффициент общее числовое значение, равное 1.

**Пример.** Если для образования единицы энергии используют уравнение  $E = \frac{1}{2}mv^2$ , где  $E$  — кинетическая энергия,  $m$  — масса материальной точки,  $v$  — скорость движения точки, то когерентную единицу энергии СИ образуют, например, следующим образом:

$$[E] = \frac{1}{2}(2[m][v]^2) = \frac{1}{2}(2\text{ кг})(1\text{ м/с})^2 = \\ = 1\text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м} = 1\text{ Н} \cdot \text{м} = 1\text{ Дж}$$

или

$$E = \frac{1}{2}[m](\sqrt{2}[v])^2 = \frac{1}{2}(1\text{ кг})(\sqrt{2}\text{ м/с})^2 = \\ = 1\text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м} = 1\text{ Н} \cdot \text{м} = 1\text{ Дж}.$$

Следовательно, единицей энергии СИ является джоуль, равный ньютон-метру. В этих примерах джоуль равен кинетической энергии тела массой 2 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, или же тела массой 1 кг, движущегося со скоростью  $\sqrt{2}$  м/с.

### 2. Правила образования десятичных кратных и дольных единиц, а также их наименований и обозначений (по ГОСТ 8.417—81)

1. Десятичные кратные и дольные единицы, а также их наименования и обозначения следует образовывать с помощью множителей и приставок (см. табл. 12).

2. Присоединение к наименованию единицы двух (или более) приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы микро-микрофарад следует писать пикофарад.

\* В связи с тем что наименование основной единицы — килограмма — содержит приставку «кило», для образования кратных и дольных единиц массы используется дольная единица грамм (0,001 кг) и приставки надо присоединять к слову «грамм», например миллиграмм (мг) вместо микрокилограмм (мккг).

Дольную единицу массы — грамм — допускается применять и без присоединения приставки.

3. Приставку или ее обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или соответственно с ее обозначением.

4. Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку следует присоединять к наименованию первой единицы, входящей в произведение или в отношение.

*Правильно*

*Неправильно*

килопаскаль-секунда на метр  
(кПа·с/м; кПа·с/м)

паскаль-килосекунда на метр  
(Па·кс/м; Па·кс/м)

Допускается применять приставку во втором множителе произведения или в знаменателе лишь в обоснованных случаях, когда такие единицы широко распространены и переход к единицам, образованным в соответствии с первой частью пункта, связан с большими трудностями, например: тонна-километр (т·км; т·км), ватт на квадратный сантиметр (Вт/см<sup>2</sup>; Вт/см<sup>2</sup>), вольт на сантиметр (В/см; В/см), ампер на квадратный миллиметр (А/мм<sup>2</sup>; А/мм<sup>2</sup>).

5. Наименования кратных и дольных единиц от единицы, возведенной в степень, следует образовывать путем присоединения приставки к наименованию исходной единицы, например для образования наименований кратной или дольной единицы от единицы площади — квадратного метра, представляющей собой вторую степень единицы длины — метра, приставку следует присоединять к наименованию этой последней единицы: квадратный километр, квадратный сантиметр и т. д.

6. Обозначения кратных и дольных единиц от единицы, возведенной в степень, следует образовывать добавлением соответствующего показателя степени к обозначению кратной или дольной от этой единицы, причем показатель означает возведение в степень кратной или дольной единицы (вместе с приставкой).

**Примеры:**

$$1. 5\text{ км}^2 = 5(10^3\text{ м})^2 = 5 \cdot 10^6\text{ м}^2.$$

$$2. 250\text{ см}^3/\text{с} = 250(10^{-2}\text{ м})^3/(1\text{ с}) = 250 \cdot 10^{-6}\text{ м}^3/\text{с}.$$

$$3. 0,002\text{ см}^{-1} = 0,002(10^{-2}\text{ м})^{-1} = 0,002 \cdot 100\text{ м}^{-1} = 0,2\text{ м}^{-1}.$$



### 3. Правила написания обозначений единиц (по ГОСТ 8.417—81)

1. Для написания значений величин следует применять обозначения единиц буквами или специальными знаками (...°, ...' ..."), причем устанавливается два вида буквенных обозначений: международные (с использованием букв латинского или греческого алфавитов) и русские (с использованием букв русского алфавита).

Международные и русские обозначения относительных и логарифмических единиц следующие: процент (%), промилле (‰), миллионная доля (ppm, млн.<sup>-1</sup>), бел (В, Б), децибел (дВ, дБ), октава (—, окт), декада (—, дек), фон (phon, фон).

2. Буквенные обозначения единиц должны печататься прямым шрифтом. В обозначениях единиц точку как знак сокращения не ставят.

3. Обозначения единиц следует применять после числовых значений величин и помещать в строку с ними (без переноса на следующую строку).

Между последней цифрой числа и обозначением единицы следует оставлять пробел.

*Правильно*

100 кВт  
80 %  
20 °С

*Неправильно*

100кВт  
80%  
20 °С; 20°С

Исключения составляют обозначения в виде знака, поднятого над строкой (п. 1), перед которыми пробела не оставляют.

*Правильно*

20°

*Неправильно*

20 °

4. При наличии десятичной дроби в числовом значении величины обозначение единицы следует помещать после всех цифр.

*Правильно*

423,06 м  
5,758° или 5°45,48'  
или 5°45'28,8"

*Неправильно*

423 м, 06  
5°, 758 или 5°45', 48  
или 5°45' 28",8

5. При указании значений величин с предельными отклонениями следует заключать числовые значения с предельными отклонениями в скобки и обозначения единицы помещать после скобок или проставлять обозначения единиц после числового значения величины и после ее предельного отклонения.

<sup>1</sup> В настоящем пособии используются русские обозначения. Однако в табл. 1 приведены международные обозначения основных единиц Международной системы единиц и тех производных единиц, которые имеют собственное наименование. Пользуясь этой таблицей, можно получить международное обозначение производной единицы любой физической величины.

*Правильно*

(100,0 ± 0,1) кг  
50 г ± 1 г

*Неправильно*

100,0 ± 0,1 кг  
50 ± 1 г

6. Допускается применять обозначения единиц в заголовках граф и в наименованиях строк (боковиках) таблиц

Номинальный расход, м <sup>3</sup> /ч	Верхний предел показаний, м <sup>3</sup>	Цена деления крайнего правого ролика, м <sup>3</sup> , не более	
40 и 60	100 000	0,002	
100, 160, 250, 400, 600 и 1000	1 000 000	0,02	
2500, 4000, 6000 и 10000	10 000 000	0,2	
Тяговая мощность, кВт	18	25	37
Габаритные размеры, мм			
длина	3080	3500	4090
ширина	1430	1685	2395
высота	2190	2745	2770
Колея, мм	1090	1340	1823
Просвет, мм	275	640	345

7. Допускается применять обозначения единиц в пояснениях обозначений величин к формулам. Помещение обозначений единиц в одной строке с формулами, выражающими зависимости между величинами или между их числовыми значениями, представленными в буквенной форме, не допускается.

*Правильно*

$v = 3,6 \text{ s/t}$ ,  
где  $v$  — скорость, км/ч  
 $s$  — путь, м  
 $t$  — время, с

*Неправильно*

$v = 3,6 \text{ s/t км/ч}$ ,  
где  $s$  — путь, м,  
 $t$  — время, с

8. Буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, следует отделять точками на средней линии, как знаками умножения<sup>1</sup>.

*Правильно*

Н·м  
А·м<sup>2</sup>  
Па·с

*Неправильно*

Нм  
Ам<sup>2</sup>  
Пас

Допускается буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, отделять пробелами, если это не приводит к недоразумению.

9. В буквенных обозначениях отношений единиц в качестве знака деления должна применяться только одна косая или горизонтальная черта. Допускается применять обозначения единиц

<sup>1</sup> В машинописных текстах допускается точку не поднимать.



в виде произведения обозначений единиц, возведенных в степени (положительные и отрицательные)<sup>1</sup>.

*Правильно*  
 $\frac{\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

*Неправильно*  
 $\frac{\text{Вт/м}^2/\text{К}}{\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{К}}$

10. При применении косой черты обозначения единиц в числителе и знаменателе следует помещать в строку, произведение обозначений единиц в знаменателе следует заключить в скобки.

*Правильно*  
 $\frac{\text{м/с}}{\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}}$

*Неправильно*  
 $\frac{\text{м/с}}{\text{Вт/м} \cdot \text{К}}$

11. При указании производной единицы, состоящей из двух (и более) единиц, не допускается комбинировать буквенные обозначения и наименования единиц, т. е. для одних единиц приводить обозначения, а для других — наименования.

*Правильно*  
 $\frac{80 \text{ км/ч}}{80 \text{ километров в час}}$

*Неправильно*  
 $\frac{80 \text{ км/час}}{80 \text{ км в час}}$

\* Допускается применять сочетания специальных знаков "...", "...", "% и ‰ с буквенными обозначениями единиц, например ...°/с и т. д.

#### 4. Практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)

МПТШ-68 основана на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым приписаны определенные значения температур — основных реперных (постоянных) точек, и на эталонных приборах, градуированных при этих температурах. В интервалах между температурами реперных точек интерполяцию осуществляют по формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и значениями температуры.

Основные реперные точки реализуются как определенные состояния фазовых равновесий некоторых чистых веществ. Равновесные состояния и приписываемые им значения температуры приведены в таблице:

<sup>1</sup> Если для одной из единиц, входящих в отношение, установлено обозначение в виде отрицательной степени (например, с<sup>-1</sup>, м<sup>-1</sup>, К<sup>-1</sup>), применять косую или горизонтальную черту не допускается.

#### Основные реперные (постоянные) точки

Состояние фазового равновесия	Принятое значение международной практической температуры	
	$T_{68}$ , К	$t_{68}$ , °С
Между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81	-259,34
Между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода при давлении 33,330 кПа (250 мм рт. ст.)	17,042	-256,108
Между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода)	20,28	-252,87
Между жидкой и парообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102	-246,048
Между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	-218,789
Между твердой, жидкой и парообразной фазами аргона (тройная точка аргона)	83,798	-189,352
Между жидкой и парообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188	-182,962
Между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16	0,01
Между жидкой и парообразной фазами воды (точки кипения воды)	373,15	100
Между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08	961,93
Между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58	1064,43

\* 1. Наряду с основными реперными точками МПТШ-68 имеются и другие реперные точки.

В качестве эталонного прибора для области температур от 13,81 до 903,89 К применяют платиновый термометр сопротивления.

В качестве эталонного прибора для температур от 630,74 до 1064,43 °С применяют термоэлектрический термометр с электродами из платинородия (10% родия) и платины.

Для областей температур выше 1337,58 К (1064,43 °С) температуру определяют в соответствии с законом излучения Планка.

2. Водород имеет две молекулярные модификации, обозначаемые приставками «орто» и «пара». Их наличие объясняется различными относительными ориентациями ядерных спинов



в двухатомных молекулах. Равновесная орто-параконцентрация зависит от температуры и при комнатной температуре соответствует примерно 75% ортоводорода и 25% пароводорода (нормальный водород). После ожижения это соотношение медленно изменяется со временем; соответствующие изменения происходят и в физических свойствах водорода. В точке кипения равновесная концентрация соответствует 0,21% орто- и 99,79% пароводорода. Температура кипения водорода этого состава («равновесного») ниже температуры кипения нормального водорода примерно на 2,12 К.

Название «равновесный водород» означает, что водород имеет свою равновесную орто-параконцентрацию при данной температуре.

3. Тройная точка аргона введена в МПТШ — 68 при частичном ее пересмотре в 1975 г.

## ТАБЛИЦЫ

### 1. Обозначения единиц физических величин

Наименование единицы	Обозначение		Наименование единицы	Обозначение	
	русское	международное		русское	международное
Ампер	А	A	Люмен	лм	lm
Ангстрем	А°	Å	Максвелл	Мкс	Mx
Астрономическая единица	а.е.	u.a.	Метр	м	m
Атмосфера	ат	at	Микрон	мк	μ
техническая			Миллиметр	мм	mm
Атмосфера	атм	atm	ртутного столба	рт. ст.	Hg
физическая			Минута	мин	min
Атомная	а.е.м.	u	Моль	моль	mol
единица массы			Ньютон	Н	N
Бар	бар	bar	Ом	Ом	Ω
Барн	б	barn(b)	Парсек	пк	pc
Бэр	бэр	rem	Паскаль	Па	Pa
Беккерель	Бк	Bq	Пьеза	пз	pz
Ватт	Вт	W	Пуаз	П	P
Вебер	Вб	Wb	Рад	рад	rad
Вольт	В	V	Радан	рад	rad
Гаусс	Гс	G(Cs)	Рентген	Р	R
Гектар	га	ha	Сантиметр	см	cm
Генри	Гн	H	Секунда	с	s
Герц	Гц	Hz	Сименс	См	S
Гильберт	Гб	Gi	Стерadian	ср	sr
Год	год	a	Стильб	сб	sb
	(лет)		Стокс	Ст	St
Грамм	г	g	Сутки	сут	d
Грей	Гр	Gy	Таунсенд	Тд	Td
Дебай	Д	D	Тесла	Тл	T
Децибел	дБ	dB	Текс	текс	tex
Джоуль	Дж	J	Тонна	т	t
Дина	дин	dyn	Тор	Тор	torr
Калория	кал	cal	Узел (морской)	уз	kn
Кандела	кд	cd	Фарад	Ф	F
Кельвин	К	K	Фарадей	—	F
Килограмм	кг	kg	Час	ч	h
Кулон	Кл	C	Электрон-вольт	эВ	eV
Кюри	Ки	Ci	Эрг	эрг	erg
Ламберт	Лб	Lb	Эрстед	Э	Oe
Литр	л	l(L)			
Люкс	лк	lx			



2. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ (ГОСТ 8.417—81)

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение		соотношение с единицей СИ
		международное	русское	
Масса	тонна	t	т	$10^3$ кг
	атомная единица массы	u	а.е.м.	$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно)
Время <sup>1</sup>	минута	min	мин	60 с
	час	h	ч	3600 с
	сутки	d	сут	86400 с
Плоский угол	градус	...°	...°	$(\pi/180)$ рад = $1,745329 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	...'	...'	$(\pi/10800)$ рад = $2,908882 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	..."	..."	$(\pi/648000)$ рад = $4,848137 \cdot 10^{-6}$ рад
Объем, вместимость	град <sup>2</sup>	...*(gon)	град	$(\pi/200)$ рад
Длина	литр <sup>3</sup>	l	л	$10^{-3}$ м <sup>3</sup>
	астрономическая единица	u.a.	а.е.	$1,49598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)
	световой год	ly	св. год	$9,4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)
	парсек	pc	пк	$3,0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)
Оптическая сила	диоптрия	—	дптр	$1 \text{ м}^{-1}$
Площадь	гектар	ha	га	$10^4$ м <sup>2</sup>
Энергия	электрон-вольт	eB	эВ	$1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизительно)
Полная мощность	вольт-ампер	VA	ВА	
Реактивная мощность	вар	var	вар	

<sup>1</sup> Допускается также применять другие единицы, получившие широкое распространение, например: неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. п.

<sup>2</sup> Допускается применять русское наименование «гон».

<sup>3</sup> Не рекомендуется применять при точных измерениях. При возможности смешения обозначения l с цифрой 1 допускается обозначение L.

\* Единицы времени — минуту, час, сутки; плоского угла — градус, минуту, секунду, астрономическую единицу, световой год, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

3. Перечень некоторых относительных и логарифмических величин и их единиц

Величина	Единица				Примечание
	Наименование	обозначение		определение	
		международное	русское		
Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную) КПД, относительное удлинение, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, магнитная восприимчивость, массовая доля, молярная доля и т. п.	единица число 1 процент промилле миллионная доля	—	—	1	$P_1, P_2$ — одноименные энергетические величины (мощности, энергии и т. п.) $F_1, F_2$ — одноименные «силовые» величины (напряжения, силы тока, давления, напряженности поля и т. п.)
		%	%	$10^{-2}$	
		‰	‰	$10^{-3}$	
		ppm	млн <sup>-1</sup>	$10^{-6}$	
Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): уровень звукового давления, усиление, ослабление и т. п.) <sup>1)</sup>	бел  децибел	В	Б	$1 \text{ Б} = \lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10 P_1$ $1 \text{ Б} = 2 \lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10} F_1$	0,1 Б
		дВ	дБ		



Продолжение табл. 3

Величина	Единица				Примечание	
	Наименование	Наименование	обозначение			определение
			международное	русское		
То же, уровень громкости	фон		phon	фон	1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Гц равен 1 дБ	
То же, частотный интервал	октава		—	—	1 октава равна $\log_2(f_2/f_1)$ при $f_2/f_1 = 2$ 1 декада равна $\log(f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 10$ $f_1, f_2$ — частоты	

<sup>1</sup> В соответствии с публикацией 27-3 Международной электротехнической комиссии (МЭК) при необходимости указать исходную величину, ее значение помещают в скобках после обозначения логарифмической величины, например для уровня звукового давления:  $L_p(\text{re } 20 \text{ мПа}) = 20 \text{ дБ}$ ;  $L_p(\text{re } 20 \text{ мПа}) = 20 \text{ дБ}$  (re — начальные буквы слова reference, т. е. исходный). При краткой форме записи значения исходной величины указывают в скобках после значения уровня, например 20 дБ (re 20 мПа) или 20 дБ (re 20 мПа).

## 4. Единицы, временно допущенные к применению\*

Наименование величины	Единица				Примечание
	наименование	обозначение		соотношение с единицей СИ	
		международное	русское		
Длина	морская миля карат	—	миля	1852 м (точно)	В морской навигации  Для драгоценных камней и жемчуга В текстильной промышленности В морской навигации
Масса		—	кар	$2 \cdot 10^{-4}$ кг (точно)	
Линейная плотность	текс	tex	текс	$10^{-6}$ кг/м (точно)	
Скорость	узел	kn	уз	$0,514(4) \frac{\text{м}}{\text{с}}$	
Частота вращения	оборот в секунду оборот в минуту бар непер	— — bar Nr	об/мин бар Нп	$1/60 \text{с}^{-1} = 0,016(6) \text{с}^{-1}$ $10^5 \text{Па}$ —	
Давление					$1 \text{ Нп} = 0,8686 \dots \text{Б} = 8,686 \dots \text{дБ}$
Натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную					

\* Приведенные в табл. 6 единицы временно допускаются применять до принятия по ним соответствующих международных решений



5. Единицы системы СГС, имеющие собственные наименования, и некоторые внесистемные единицы, применяемые в теоретической физике

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение		соотношение с единицей СИ
		русское	международное	
Длина	икс-единица	икс-ед.	X	$1,00206 \cdot 10^{-13} \text{ м}$ $1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ (приблизительно) <sup>1</sup>
Масса	атомная единица массы	а.е.м.	u	
Площадь	барн	б	b	$10^{-28} \text{ м}^2$
Сила, вес	дина	дин	din	$10^{-5} \text{ Н}$
Работа	эрг	эрг	erg	$10^{-7} \text{ Дж}$
Энергия	электрон-вольт	эВ	eV	$1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ (приблизительно) <sup>1</sup>
Динамическая вязкость	пуаз	П	P	$0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Кинематическая вязкость	стокс	Ст	St	$10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
Магнитный поток	максвелл	Мкс	Mx	$10^{-8} \text{ Вб}$
Магнитная индукция	гаусс	Гс	Gs	$10^{-4} \text{ Тл}$
Магнитодвижущая сила	гильберт	Гб	Gb	$10/(4\pi) \text{ А} = 0,795775 \text{ А}$
Разность магнитных потенциалов	эрстед	Э	Oe	$10^3/(4\pi) \text{ А/м} = 79,5775 \text{ А/м}$
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность изотопа)	распад в секунду	расп./с	—	$1 \text{ с}^{-1}$
Поток ионизирующих частиц или фотонов	частица в секунду	част./с	—	$1 \text{ с}^{-1}$
Плотность потока ионизирующих частиц или фотонов	частица в секунду на квадратный метр	част./ (с·м <sup>2</sup> )	—	$1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$

<sup>1</sup> Более точные значения см. в табл. 12.

6. Соотношения между единицами электромагнитных величин

Наименование величины	Соотношение между единицами
Сила электрического тока	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 3,33564 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ $1 \text{ СГСМ} = 10 \text{ А}$
Количество электричества.	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 3,33564 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$
Электрический заряд	$1 \text{ СГСМ} = 10 \text{ Кл}$
Поверхностная плотность электрического заряда	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 3,33564 \times 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$ $1 \text{ СГСМ} = 10^5 \text{ Кл/м}^2$
Пространственная плотность электрического заряда	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 3,33564 \times 10^{-4} \text{ Кл/м}^3$ $1 \text{ СГСМ} = 1 \cdot 10^7 \text{ Кл/м}^3$
Напряженность электрического поля	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 2,997925 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ $1 \text{ СГСМ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ В/м}$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, ЭДС	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 2,997925 \cdot 10^2 \text{ В}$ $1 \text{ СГСМ} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ В}$
Поток электрического смещения	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 2,65442 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$ $1 \text{ СГСМ} = 0,795775 \text{ Кл}$
Электрическое смещение	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 2,65442 \times 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$ $1 \text{ СГСМ} = 7,95775 \cdot 10^3 \text{ Кл/м}^2$
Электрическая емкость	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 1,11265 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ $1 \text{ СГСМ} = 1 \cdot 10^9 \text{ Ф}$
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 8,854186 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$ $1 \text{ СГСМ} = 7,95775 \cdot 10^9 \text{ Ф/м}$
Электрический момент	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 3,33564 \times 10^{-12} \text{ Кл} \cdot \text{м}$ $1 \text{ СГСМ} = 0,1 \text{ Кл} \cdot \text{м}$
Плотность электрического тока	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 3,33564 \times 10^{-6} \text{ А/м}^2$ $1 \text{ СГСМ} = 1 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$
Линейная плотность электрического тока	$1 \text{ СГС (СГСЭ)} = 3,33564 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}$ $1 \text{ СГСМ} = 1 \cdot 10^3 \text{ А/м}$
Напряженность магнитного поля	$1 \text{ СГС (СГСМ), эрстед (Э)} = 79,5775 \text{ А/м}$ $1 \text{ СГСЭ} = 2,65442 \cdot 10^{-9} \text{ А/м}$
Магнитодвижущая сила. Разность магнитных потенциалов	$1 \text{ СГС (СГСМ), гильберт (Гб)} = 0,795775 \text{ А}$ $1 \text{ СГСЭ} = 2,65442 \cdot 10^{-11} \text{ А}$
Магнитная индукция	$1 \text{ СГС (СГСМ), гаусс (Гс)} = 1 \times 10^{-4} \text{ Тл}$ $1 \text{ СГСЭ} = 2,997925 \cdot 10^6 \text{ Тл}$
Магнитный поток	$1 \text{ СГС (СГСМ), максвелл (Мкс)} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Вб}$ $1 \text{ СГСЭ} = 299,7925 \text{ Вб}$
Индуктивность. Взаимная индуктивность	$1 \text{ СГС (СГСМ)} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}$ $1 \text{ СГСЭ} = 8,98755 \cdot 10^{11} \text{ Гн}$
Абсолютная магнитная проницаемость	$1 \text{ СГС (СГСМ)} = 1,256637 \times 10^{-6} \text{ Гн/м}$ $1 \text{ СГСЭ} = 1,12941 \cdot 10^{15} \text{ Гн/м}$
Магнитный момент (амперовский)	$1 \text{ СГС (СГСМ)} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ $1 \text{ СГСЭ} = 3,33564 \cdot 10^{-14} \text{ А} \cdot \text{м}^2$



Наименование величины	Соотношение между единицами
Магнитный момент (кулоновский)	1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^{-10}$ Вб · м
Намагниченность	1 СГСЭ = 2,997925 Вб · м
Электрическое сопротивление	1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^3$ А/м 1 СГСЭ = $3,33564 \cdot 10^{-8}$ А/м
Электрическая проводимость	1 СГС (СГСЭ) = $8,98755 \cdot 10^{11}$ Ом 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-9}$ Ом
Удельное электрическое сопротивление	1 СГС (СГСЭ) = $1,11265 \cdot 10^{-12}$ См 1 СГСМ = $1 \cdot 10^9$ См
Удельная электрическая проводимость	1 СГС (СГСЭ) = $8,98755 \cdot 10^9$ Ом · м 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-11}$ Ом · м
Магнитное сопротивление	1 СГС (СГСЭ) = $1,11265 \times 10^{-10}$ См/м 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{11}$ См/м
	1 СГС (СГСМ) = $79,5775 \cdot 10^6$ А/Вб 1 СГСЭ = $8,854186 \cdot 10^{-14}$ А/Вб

## 7. Единицы естественных систем

Величина	Определяющее уравнение	Соотношение с единицей СГС
<i>Система атомных единиц Хартри</i>		
Электрический заряд	$Q = e$	$4,8032 \cdot 10^{-10}$ СГС <sub>Q</sub>
Масса	$m = m_e$	$9,1095 \cdot 10^{-28}$ г
Угловой момент (момент количества движения)	$\hbar = h/(2\pi)$	$1,0546 \cdot 10^{-27}$ эрг · с
Длина (радиус Бора)	$a_0 = \hbar^2/(m_e e^2)$	$5,2918 \cdot 10^{-9}$ см
Скорость	$v = e^2/\hbar$	$2,1877 \cdot 10^8$ см · с <sup>-1</sup>
Импульс	$p = m_e e^2/\hbar$	$1,9929 \cdot 10^{-19}$ г · см · с <sup>-1</sup>
Энергия	$\varepsilon = m_e e^4/\hbar^2$	$4,3598 \cdot 10^{-11}$ эрг = = 27,212 эВ
Время	$t = \hbar^3/(m_e e^4)$	$2,4189 \cdot 10^{-17}$ с
Частота	$\nu = m_e e^4/\hbar^3$	$4,1341 \cdot 10^{16}$ с <sup>-1</sup>
Напряженность электрического поля	$E = m_e^2 e^5/\hbar$	$1,7153 \cdot 10^7$ СГС <sub>E</sub> = = $5,1422 \cdot 10^9$ В · см <sup>-1</sup>
Потенциал	$\varphi = m_e e^3/\hbar^2 = e/a_0$	$9,0767 \cdot 10^{-2}$ СГС <sub>φ</sub> = = 27,212 В
Магнитный момент	$p_m = \hbar^2/(m_e e) = 2\mu_B/\alpha$	$2,5418 \cdot 10^{-18}$ эрг · Гс <sup>-1</sup> = = $2,5418 \cdot 10^{-21}$ Дж · Тл <sup>-1</sup>
Сечение рассеяния	$\sigma = a_0^2$	$2,8003 \cdot 10^{-17}$ см <sup>2</sup>
Объем, поляризуемость	$V(\alpha_0) = a_0^3$	$1,4818 \cdot 10^{-25}$ см <sup>3</sup>
Плотность числа частиц	$n = a_0^{-3}$	$6,7483 \cdot 10^{24}$ см <sup>-3</sup>

Величина	Определяющее уравнение	Соотношение с единицей СГС
Плотность тока	$j = env = m_e^3 e^9/\hbar^7$	$7,0911 \cdot 10^{23}$ СГС <sub>j</sub> = = $2,3653 \cdot 10^{14}$ А · см <sup>-2</sup>
<i>Система релятивистских единиц</i>		
Скорость (скорость света)	$v = c$	$2,9979 \cdot 10^{10}$ см · с <sup>-1</sup> = = $2,9979 \cdot 10^8$ м · с <sup>-1</sup>
Масса (масса электрона)	$m = m_e$	$9,1095 \cdot 10^{-28}$ г
Угловой момент (момент количества движения)	$\hbar = h/(2\pi)$	$1,0546 \cdot 10^{-27}$ эрг · с
Длина	$l = \hbar/(m_e c) = \lambda_c = \alpha a_0$	$3,8616 \cdot 10^{-11}$ см
Время	$t = \hbar/(m_e c^2)$	$1,2881 \cdot 10^{-21}$ с
Импульс	$p = m_e c$	$2,7310 \cdot 10^{-17}$ г · см · с <sup>-1</sup>
Энергия	$\varepsilon = m_e c^2$	$8,1872 \cdot 10^{-7}$ эрг = = $8,1872 \cdot 10^{-14}$ Дж = = $5,1100 \cdot 10^5$ эВ
Ускорение	$a = m_e c^3/\hbar$	$2,3274 \cdot 10^{31}$ см · с <sup>-2</sup>
Частота	$\nu = m_e c^2/\hbar$	$7,7634 \cdot 10^{20}$ с <sup>-1</sup>
Сила	$F = m_e^2 c^3/\hbar$	$2,1202 \cdot 10^4$ дин = 0,21202 Н
Дипольный момент	$p = \hbar^{3/2}/(m_e c^{1/2})$	$2,1713 \cdot 10^{-19}$ ед. СГС <sub>Q</sub> × × см = 0,21713 Д (дебай)
Электрический заряд	$Q = e/\alpha^{1/2} = (\hbar c)^{1/2}$	$5,6228 \cdot 10^{-9}$ СГС = = $1,8756 \cdot 10^{-18}$ Кл
Напряженность электрического поля	$E = m_e^2 c^{5/2}/\hbar^{3/2}$	$3,7706 \cdot 10^{12}$ СГС <sub>E</sub> = = $1,1304 \cdot 10^{15}$ В · см <sup>-1</sup>
Потенциал	$\varphi = m_e c^{3/2}/\hbar^{1/2} = e/\lambda_c \alpha^{1/2}$	$1,4561 \cdot 10^2$ СГС <sub>φ</sub> = = $4,3652 \cdot 10^4$ В
Магнитный момент	$p_m = \hbar^{3/2}/(m_e c^{1/2}) = 2\mu_B/\alpha^{1/2}$	$2,1713 \cdot 10^{-19}$ эрг · Гс <sup>-1</sup> = = $2,1713 \cdot 10^{-22}$ Дж · Тл <sup>-1</sup>
Сечение рассеяния	$\sigma = \hbar^2/(m_e^2 c^2) = \lambda_c^2/\alpha^2 = \alpha^2 a_0^2$	$1,4912 \cdot 10^{-21}$ см <sup>2</sup>
Объем, поляризуемость	$V = \hbar^3/(m_e^3 c^3) = \lambda_c^3/\alpha^3 = \alpha^3 a_0^3$	$5,7584 \cdot 10^{-32}$ см <sup>3</sup>
Плотность числа частиц	$n = m_e^3 c^3/\hbar^3 = \lambda_c^{-3}$	$1,7366 \cdot 10^{31}$ см <sup>-3</sup>
Плотность тока	$j = m_e^3 c^{9/2}/\hbar^{5/2}$	$2,9273 \cdot 10^{33}$ СГС <sub>j</sub> = = $9,7644 \cdot 10^{23}$ А · см <sup>-2</sup>



## 8. Соотношение внесистемных единиц радиоактивности и ионизирующих излучений с единицами СИ

Наименование величины	Внесистемные единицы			Соотношение с единицей СИ
	наименование	обозначение		
		международное	русское	
Плотность потока ионизирующих частиц  Интенсивность излучения	сантиметр в минус второй степени- час в минус первой степени	$\text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$	$\text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$	$2,778 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
	эрг-сантиметр в минус второй степени-секунда в минус первой степени	$\text{эрг}(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$	$\text{эрг}(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$	$10^{-3} \text{ Вт/м}^2$
	эрг-сантиметр в минус второй степени-минута в минус первой степени	$\text{эрг}(\text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1})$	$\text{эрг}(\text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1})$	$1,667 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$
	эрг-сантиметр в минус второй степени-час в минус первой степени	$\text{эрг}(\text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1})$	$\text{эрг}(\text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1})$	$2,778 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м}^2$
Поглощенная доза излучения	эрг-грамм в минус первой степени	$\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1}$	$\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1}$	$10^{-4} \text{ Дж/кг}$
	рад	rad	рад	0,01 Гр
Мощность поглощен- ной дозы излучения	эрг-грамм в минус первой степени- секунда в минус первой степени	$\text{эрг}(\text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1})$	$\text{эрг}(\text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1})$	$10^{-4} \text{ Вт/кг}$
	рад-секунда в минус первой степени	$\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$	$\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$	0,01 Гр/с
	рад-минута в минус первой степени	$\text{рад} \cdot \text{мин}^{-1}$	$\text{рад} \cdot \text{мин}^{-1}$	$1,667 \cdot 10^{-4} \text{ Гр/с}$
	рад-час в минус первой степени	$\text{рад} \cdot \text{ч}^{-1}$	$\text{рад} \cdot \text{ч}^{-1}$	$2,778 \cdot 10^{-6} \text{ Гр/с}$

Наименование величины	Внесистемные единицы			Соотношение с единицей СИ
	наименование	обозначение		
		международное	русское	
Экспозиционная доза рентгеновского и гамма- излучений	рентген	R	P	$2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
	рентген в секунду рентген в минуту рентген в час	R/s R/min R/h	P/c P/мин P/ч	$2,58 \cdot 10^{-4}$ А/кг $4,3 \cdot 10^{-6}$ А/кг $7,17 \cdot 10^{-8}$ А/кг



Наименование величины	СИ	СГС
Сила взаимодействия точечных зарядов (закон Кулона)	$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$	$F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
Напряженность электрического поля: точечного заряда	$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$	$E = \frac{Q}{r^2}$
бесконечно длинной заряженной нити	$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$	$E = \frac{2\tau}{r}$
бесконечной заряженной плоскости	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$	$E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon}$
заряженной сферы (для $r \geq R$ )	$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$	$E = \frac{Q}{r^2}$
плоского конденсатора	$E = \sigma/(\epsilon\epsilon_0)$	$E = 4\pi\sigma/\epsilon$
электрического диполя	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \alpha}$	$E = \frac{p}{r^3} \times$ $\times (1 + 3 \cos^2 \alpha)^{1/2}$
Электрическое смещение	$D = \epsilon\epsilon_0 E$	$D = \epsilon E$
Поток электрического смещения (теорема Гаусса)	$\Psi = \sum_{i=1}^n Q_i$	$\Psi = 4\pi \sum_{i=1}^n Q_i$
Электрическая емкость: уединенной проводящей сферы	$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 r$	$C = \epsilon r$
плоского конденсатора	$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$
цилиндрического конденсатора	$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(r_2/r_1)}$	$C = \frac{cl}{2 \ln(r_2/r_1)}$
сферического конденсатора	$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$	$C = \frac{\epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$
Потенциал электрического поля: точечного заряда	$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$	$\varphi = \frac{Q}{\epsilon r}$
диполя	$\varphi = \frac{p \cos \alpha}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}$	$\varphi = \frac{p \cos \alpha}{\epsilon r^2}$
Объемная плотность энергии электрического поля	$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$	$w = \frac{\epsilon E^2}{8\pi}$

Наименование величины	СИ	СГС
Магнитная индукция поля, созданного элементом тока (закон Био — Савара — Лапласа)	$dB = \frac{\mu\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$	$dB = \frac{1}{c} \frac{\mu dl \sin \alpha}{r^2}$
Магнитная индукция поля прямого тока	$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$	$B = \frac{1}{c} \frac{2\mu I}{r}$
Магнитная индукция в центре кругового тока	$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$	$B = \frac{1}{c} \frac{2\pi\mu I}{R}$
Магнитная индукция на оси соленоида	$B = \mu\mu_0 n I$	$B = \frac{1}{c} 4\pi\mu n I$
Магнитная индукция поля движущегося заряда	$B = \frac{\mu\mu_0 Q v \sin \alpha}{4\pi r^2}$	$B = \frac{1}{c} \frac{\mu Q v \sin \alpha}{r^2}$
Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле (закон Ампера)	$dF = BI \sin \alpha dl$	$dF = \frac{1}{c} BI \sin \alpha dl$
Сила взаимодействия двух бесконечно длинных параллельных токов	$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$	$F = \frac{1}{c^2} \frac{2\mu I_1 I_2 l}{r}$
Сила Лоренца	$F = Q(E + [vB])$	$F = Q\left(E + \frac{1}{c}[vB]\right)$
Индуктивность соленоида	$L = \mu\mu_0 n^2 V$	$L = 4\pi\mu n^2 V$
Электродвижущая сила индукции (закон Фарадея — Максвелла)	$\mathcal{E}_i = -d\Psi/dt$	$\mathcal{E}_i = -(1/c)d\Psi/dt$
Электродвижущая сила самоиндукции	$\mathcal{E}_i = -LdI/dt$	$\mathcal{E}_i = -(1/c^2)LdI/dt$
Связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля	$B = \mu\mu_0 H$	$B = \mu H$
Энергия магнитного поля	$W = \frac{LI^2}{2}$	$W = \frac{1}{c^2} \frac{LI^2}{2}$
Плотность энергии магнитного поля	$w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$	$w = \frac{\mu H^2}{2}$
Циркуляция вектора напряженности магнитного поля	$\oint H_i dl = \sum_{i=1}^n I_i$	$\oint H_i dl = \frac{1}{c} 4\pi \sum_{i=1}^n I_i$
Магнитодвижущая сила	$F = \sum_{i=1}^n I_i$	$F = \frac{4\pi}{c} \sum_{i=1}^n I_i$



Наименование величины	СИ	СГС
Связь между векторами $B$ , $H$ , $J$ в магнетике	$B = \mu_0 H + \mu_0 J$	$B = H + 4\pi J$
Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью	$\mu = 1 + \chi$	$\mu = 1 + 4\pi\chi$
Связь между электрической и магнитной постоянными	$\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$	$\epsilon_0 \mu_0 = 1$
Вектор Пойнтинга	$S = [EH]$	$S = \frac{c}{4\pi} [EH]$
Уравнения Максвелла в интегральной форме	$\oint_L E_i dl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ $\oint_L H dl = \frac{\partial \Phi_0}{\partial t}$	$c \oint_L E_i dl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ $c \oint_L H dl = \frac{\partial \Phi_0}{\partial t}$

## 10. Фундаментальные физические постоянные

Величина	Обозначение	Значение величины	Относительная погрешность, млн. <sup>-1</sup>
Скорость света в вакууме	$c$	299 792 458 м/с	(точно)
Магнитная постоянная ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ )	$\mu_0$	12,566370614... $10^{-7}$ Гн/м	(точно)
Электрическая постоянная ( $1/\mu_0 c^2$ )	$\epsilon_0$	8,854187817... $10^{-12}$ Ф/м	(точно)
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67259(85) \cdot 10^{-11}$ Н·м <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup>	128
Постоянная Планка $h/(2\pi)$	$\hbar$	$6,6260755(40) \cdot 10^{-34}$ Дж·с	0,60
Элементарный заряд	$e$	$1,60217733(49) \cdot 10^{-19}$ Кл	0,30
Квант магнитного потока [ $h/(2e)$ ]	$\Phi_0$	$2,06783461(61) \cdot 10^{-15}$ Вб	0,30
Масса электрона	$m_e$	$9,1093897(54) \cdot 10^{-31}$ кг	0,59
		$5,48579903(13) \cdot 10^{-4}$ а.е.м.	0,023
Постоянная тонкой структуры	$\alpha$	$7,29735308(33) \cdot 10^{-3}$	0,045
Отношение заряда электрона к его массе	$-e/m_e$	$-1,75881962(53) \cdot 10^{11}$ Кл/кг	0,30

Величина	Обозначение	Значение величины	Относительная погрешность, млн. <sup>-1</sup>
Комптоновская длина волны электрона [ $h/(m_e c)$ ]	$\lambda_c$	$2,42631058(22) \cdot 10^{-12}$ м	0,089
Классический радиус электрона	$r_e$	$2,81794092(38) \cdot 10^{-15}$ м	0,13
Магнитный момент электрона	$\mu_e$	$928,47701(31) \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл	0,34
То же, в магнетонах Бора	$\mu_e/\mu_B$	1,001159652 193(10)	$1 \cdot 10^{-5}$
То же, в ядерных магнетонах	$\mu_e/\mu_N$	1838,282000(37)	0,020
Масса протона	$m_p$	$1,6726231(10) \cdot 10^{-27}$ кг	0,59
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e$	1836,152701(37)	0,020
Магнитный момент протона	$\mu_p$	$1,41060761(17) \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл	0,34
То же, в магнетонах Бора	$\mu_p/\mu_B$	$1,521032202(15) \cdot 10^{-3}$	0,010
То же, в ядерных магнетонах	$\mu_p/\mu_N$	2,792847386(63)	0,023
Гиромагнитное отношение протона	$\gamma_p$	$26751,5528(81) \cdot 10^4$ с <sup>-1</sup> Тл <sup>-1</sup>	0,30
Масса нейтрона	$m_n$	$1,6749286(10) \cdot 10^{-27}$ кг	0,59
Отношение массы нейтрона к массе электрона	$m_n/m_e$	1838,683662(40)	0,022
Отношение массы нейтрона к массе протона	$m_n/m_p$	1,001378404(9)	0,009
Магнитный момент нейтрона	$\mu_n$	$0,96623707(40) \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл	0,41
То же, в магнетонах Бора	$\mu_n/\mu_B$	$1,04187563(25) \cdot 10^{-3}$	0,24
То же, в ядерных магнетонах	$\mu_n/\mu_N$	1,91304275(45)	0,24
Постоянная Ридберга [ $m_e c \alpha^2 / (2h)$ ]	$R_\infty$	$10973731,534(13)$ м <sup>-1</sup>	0,0012
	$R_\infty c$	$3,2808419499(39) \cdot 10^{15}$ Гц	
	$R_\infty h c$	$2,1798741(13) \cdot 10^{-18}$ Дж	0,60
	$R_\infty h c / e$	13,6056981(40) эВ	0,30
Постоянная Авогадро	$N_A, L$	$6,0221367(36) \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>	0,59
Постоянная Фарадея ( $N_A e$ )	$F$	96485,309(29) Кл·моль <sup>-1</sup>	0,30
Молярная газовая постоянная	$R$	8,314510(70) Дж/(моль·К)	8,4



Продолжение табл. 10

Величина	Обозначение	Значение величины	Относительная погрешность, млн. $^{-1}$
Постоянная Больцмана ( $R/N_A$ )	$k$	$1,380658(12) \cdot 10^{-23}$ Дж/К	8,5
Постоянная Стефана — Больцмана $[(\pi^2/60)k^4/(h^3c^2)]$	$\sigma$	$5,67051(19) \cdot 10^{-8}$ Вт/(м $^2$ ·К $^4$ )	34
Отношение Джозефсона	$2e/h$	$4,8359767(14) \cdot 10^{14}$ Гц/В	0,30
Магнетон Бора	$\mu_B$	$9,2740154(31) \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл	0,34
Ядерный магнетон	$\mu_N$	$5,0507866(17) \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл	0,34
Боровский радиус $[a/(4\pi R_\infty)]$	$a_0$	$0,529177249(24) \cdot 10^{-10}$ м	0,045
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,6605402(10) \cdot 10^{-27}$ кг	0,59
Электронвольт	эВ	$1,60217733(49) \cdot 10^{-19}$ Дж	0,30
Длина Планка	$l_P$	$1,61605(10) \cdot 10^{-35}$ м	0,64
Масса Планка	$m_P$	$2,17671(14) \cdot 10^{-8}$ кг	0,64
Время Планка	$t_P$	$5,39056(34) \cdot 10^{-44}$ с	0,64
Энергия Хартри	$E_h$	$4,3597482(26) \cdot 10^{-18}$ Дж	0,60

## 11. Соотношения между единицами физических величин

## Длина

Ангстрем ( $\text{\AA}$ ,  $\text{\AA}$ )<sup>1</sup>; 1  $\text{\AA}$  =  $10^{-10}$  м  
 Астрономическая единица (и. а., а. е.); 1 а. е. =  $1,49597870 \cdot 10^{11}$  м  
 Дюйм (in, —); 1 дюйм = 0,0254 м (точно)  
 Икс-единица (X, икс-ед); 1 икс-ед =  $1,00206 \cdot 10^{-13}$  м  
 Кабельтов (—, —); 1 кабельтов = 185,2 м  
 Микрон ( $\mu$ , мк); 1 мк = 1 мкм =  $1 \cdot 10^{-6}$  м  
 Миля морская (n. mile, —); 1 миля морская = 1852 м (точно)  
 Миля сухопутная (mile, —); 1 миля сухопутная = 1609,344 м (точно)  
 Парсек (pc, пк); 1 пк =  $3,085678 \cdot 10^{16}$  м  
 Световой год (ly, св. год); 1 св. год =  $9,460530 \cdot 10^{15}$  м  
 Ферми (—, —); 1 ферми =  $1 \cdot 10^{-15}$  м  
 Фут (ft, —); 1 фут = 0,3048 м (точно)  
 Ярд (yd, —); 1 ярд = 0,9144 м (точно)

## Площадь

Ар (ar, ар); 1 ар = 100 м $^2$   
 Бари (b, б); 1 б =  $1 \cdot 10^{-28}$  м $^2$   
 Гектар (ha, га); 1 га =  $1 \cdot 10^4$  м $^2$

<sup>1</sup> В скобках даны международное и русское обозначения единиц. В случае отсутствия обозначения единицы вместо него поставлен знак «—».

Квадратный дюйм (in $^2$ , —); 1 кв. дюйм =  $6,4516 \cdot 10^{-4}$  м $^2$  (точно)  
 Квадратный фут (ft $^2$ , —); 1 кв. фут =  $9,29030 \cdot 10^{-2}$  м $^2$   
 Квадратный ярд (yd $^2$ , —); 1 кв. ярд = 0,836127 м $^2$   
 Акр (acre, акр); 1 акр = 4840 кв. ярд = 4046,86 м $^2$

## Объем (вместимость)

Баррель английский (для сыпучих веществ) (—, —); 1 баррель англ. = 0,16365 м $^3$   
 Баррель нефтяной (США) (—, —); 1 баррель нефтяной (США) = 0,158988 м $^3$   
 Баррель сухой (США) [bbl(US)<sup>1</sup>, —], 1 баррель сухой (США) = 0,115628 м $^3$   
 Бушель (Великобр.) (—, —); 1 бушель (Великобр.) =  $3,63687 \times 10^{-2}$  м $^3$   
 Бушель (США) (bu, —); 1 бушель (США) =  $3,52393 \cdot 10^{-2}$  м $^3$   
 Галлон (Великобр.) [gal(UK), —]; 1 галлон (Великобр.) =  $4,54609 \cdot 10^{-3}$  м $^3$   
 Галлон для жидкостей (США) [gal(US), —]; 1 галлон для жидк. =  $3,78543 \cdot 10^{-3}$  м $^3$   
 Галлон для сыпучих веществ (США) (—, —); 1 галлон для сыпучих веществ (США) =  $4,405 \cdot 10^{-3}$  м $^3$   
 Дюйм кубический (in $^3$ , —); 1 дюйм куб. =  $1,63871 \cdot 10^{-5}$  м $^3$   
 Литр (l, L, л); 1 л =  $1 \cdot 10^{-3}$  м $^3$   
 Лямбда ( $\lambda$ ,  $\lambda$ ); 1  $\lambda$  =  $1 \cdot 10^{-9}$  м $^3$   
 Пинта (Великобр.) [pt(UK), —]; 1 пинта (Великобр.) =  $5,68261 \times 10^{-4}$  м $^3$   
 Пинта для жидкостей (США) [ligpt(US), —]; пинта для жидкостей (США) =  $4,73179 \cdot 10^{-4}$  м $^3$   
 Пинта для сыпучих веществ (США) [drypt(US), —]; 1 пинта для сыпучих веществ (США) =  $5,50614 \cdot 10^{-4}$  м $^3$   
 Унция (Великобр.) [floz(UK), —]; 1 унция (Великобр.) =  $2,841 \times 10^{-5}$  м $^3$   
 Унция (США) [floz(US), —]; 1 унция (США) =  $2,95737 \cdot 10^{-5}$  м $^3$   
 Фут кубический (ft $^3$ , —); 1 фут куб. =  $2,83168 \cdot 10^{-2}$  м $^3$   
 Ярд кубический (yd $^3$ , —); 1 ярд куб. = 0,76455 м $^3$

## Объемный расход

Кубический дециметр в секунду (dm $^3$ /s, дм $^3$ /с); 1 дм $^3$ /с =  $1 \times 10^{-3}$  м $^3$ /с  
 Кубический сантиметр в секунду (cm $^3$ /s, см $^3$ /с); 1 см $^3$ /с =  $1 \times 10^{-6}$  м $^3$ /с  
 Кубический метр в час (m $^3$ /h, м $^3$ /ч); 1 м $^3$ /ч =  $0,27778 \cdot 10^{-3}$  м $^3$ /с  
 Литр в минуту (L/min, л/мин); 1 л/мин =  $1,6667 \cdot 10^{-5}$  м $^3$ /с  
 Кубический дюйм в секунду (in $^3$ /s, —); 1 куб. дюйм в секунду =  $1,6387 \cdot 10^{-5}$  м $^3$ /с

<sup>1</sup> В некоторых случаях единицы с одинаковым наименованием имеют различные значения в США и Великобритании. В этих случаях в международных обозначениях в скобках ставятся соответственно US и UK.



Кубический фут в секунду ( $\text{ft}^3/\text{s}$ , —); 1 куб. фут в секунду =  $0,0283168 \text{ м}^3/\text{с}$   
Литр в час ( $\text{l/h}$ , л/ч); 1 л/ч =  $2,77(7) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$

#### Массовый расход

Килограмм в минуту ( $\text{kg/min}$ , кг/мин); 1 кг/мин =  $1,6667 \times 10^{-2} \text{ кг/с}$   
Килограмм в час ( $\text{kg/h}$ , кг/ч); 1 кг/ч =  $2,7778 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$

#### Плоский угол

Град, гон ( $\dots^\circ$ , град); 1 град =  $\pi/200 = 0,01570796 \text{ рад}$   
Градус ( $\dots^\circ$ , ...°); 1° =  $0,01745329 \text{ рад}$   
Минута ( $\dots'$ , ...'); 1' =  $2,908882 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$   
Оборот (полный угол) (—, об); 1 об =  $2\pi \text{ рад} = 6,283185 \text{ рад}$   
Прямой угол ( $\dots^\circ$ , ...°); 1° =  $1,570796 \text{ рад}$   
Румб в метеорологии (—, —); 1 румб в метеорологии =  $0,392699 \text{ рад}$   
Румб в морской навигации (—, —); 1 румб в морской навигации =  $0,1963495 \text{ рад}$   
Секунда ( $\dots''$ , ...''); 1'' =  $4,848137 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$

#### Телесный угол

Квадратный градус ( $\dots^\square$ , ...°); 1 ° =  $3,0462 \cdot 10^{-4} \text{ ср}$   
Полный телесный угол ( $\Omega$ , Ω); 1 Ω =  $4\pi \text{ ср} = 12,56637 \text{ ср}$

#### Время

Год (а, год); 1 год =  $3,15569259747 \cdot 10^7 \text{ с}$  (на 1900 г.)<sup>1</sup>  
Минута (min, мин); 1 мин = 60 с  
Сутки (d, сут); 1 сут = 86400 с  
Час (h, ч); 1 ч = 3600 с

#### Температура

Градус Ранкина ( $^\circ\text{Ra}$ , °Ra); 1°Ra =  $0,556 \text{ К} = 5/9 \text{ К}$   
Градус Реомюра ( $^\circ\text{R}$ , °R); 1°R =  $1,25 \text{ К}$   
Градус Фаренгейта ( $^\circ\text{F}$ , °F); 1°F =  $0,556 \text{ К} = 5/9 \text{ К}$   
Градус Цельсия ( $^\circ\text{C}$ , °C); 1°C = 1 К

#### Скорость

Километр в час ( $\text{km/h}$ , км/ч); 1 км/ч =  $0,27778 \text{ м/с}$   
Миля в час ( $\text{mile/h}$ , —); 1 миля в час =  $0,44704 \text{ м/с}$  (точно)  
Узел морской (kn, уз); 1 уз =  $0,514444 \text{ м/с}$   
Фут в секунду ( $\text{ft/s}$ , —); 1 фут в секунду =  $0,3048 \text{ м/с}$  (точно)

<sup>1</sup> За 100 лет год сокращается на **0,530**

#### Ускорение

Гал (Gal, Гл); 1 Гл =  $0,01 \text{ м/с}^2$

#### Угловая скорость

Градус в секунду ( $^\circ/\text{s}$ , °/с); 1°/с =  $0,0174533 \text{ рад/с}$   
Оборот в минуту (—, —); 1 оборот в минуту =  $0,1047197 \text{ рад/с}$   
Оборот в секунду (—, —); 1 оборот в секунду =  $6,283185 \text{ рад/с}$   
Прямой угол в секунду ( $^\circ/\text{s}$ , °/с); 1°/с =  $1,57080 \text{ рад/с}$   
Радиян в минуту ( $\text{rad/min}$ , рад/мин); 1 рад/мин =  $0,016(6) \text{ рад/с}$

#### Угловое ускорение

Градус на секунду в квадрате ( $^\circ/\text{s}^2$ , ...°/с²); 1 °/с² =  $0,017453 \text{ рад/с}^2$   
Оборот на секунду в квадрате ( $\text{r/s}^2$ , об/с²); 1 об/с² =  $6,283185 \text{ рад/с}^2$   
Оборот на минуту в квадрате ( $\text{r/min}^2$ , об/мин²); 1 об/мин² =  $0,104719 \text{ рад/с}^2$

#### Частота вращения

Оборот в секунду ( $\text{r/s}$ , об/с); 1 об/с =  $1 \text{ с}^{-1}$   
Оборот в минуту ( $\text{r/min}$ , об/мин); 1 об/мин =  $0,01666 \text{ с}^{-1}$

#### Масса

Атомная единица массы (u, а. е. м.); 1 а. е. м. =  $1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$   
Гамма ( $\gamma$ , —); 1 гамма =  $1 \cdot 10^{-9} \text{ кг}$   
Грамм (g, г); 1 г =  $1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$   
Гран (gr, —); 1 гран =  $6,479891 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$   
Карат (—, кар); 1 кар =  $2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$  (точно)  
Слаг (slug, —); 1 слаг =  $14,5939 \text{ кг}$   
Килограмм-сила-секунда в квадрате на метр (—, кгс·с²/м); 1 кгс·с²/м =  $9,80665 \text{ кг}$   
Тонна (t, т); 1 т = 1000 кг  
Тонна (Брит.) (ton, —); 1 тонна (Брит.) = 1016,05 кг  
Тонна короткая (Брит.) (sh·ton, —); 1 тонна короткая (Брит.) = 907,185 кг  
Унция аптекарская (oz apoth, —); 1 унция аптекарская =  $31,1035 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$   
Унция аптекарская, русская (—, —); 1 унция аптекарская, русская =  $2,986 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$   
Унция торговая (oz, —); 1 унция торговая =  $28,3495 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$   
Унция тройская (oz tr, —); 1 унция тройская =  $31,1035 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$   
Фунт торговый (lb, —); 1 фунт торговый =  $0,45359237 \text{ кг}$   
Фунт в системе русских мер (—, —); 1 фунт в системе русских мер =  $0,40951241 \text{ кг}$   
Фунт (США) [lb (US), —]; 1 фунт (США) =  $0,4535924277 \text{ кг}$



Центнер, кратная единица СИ (q, ц); 1 ц = 100 кг  
 Центнер (Брит.) (cwt, —); 1 центнер (Брит.) = 50,8023 кг  
 Центнер короткий (Брит.) (sh. cwt, —); 1 центнер короткий = 45,3592 кг

#### Плотность

Грамм на кубический дюйм (g/in<sup>3</sup>, —); 1 грамм на кубический дюйм = 61,0 кг/м<sup>3</sup>  
 Грамм на кубический метр (—, г/м<sup>3</sup>); 1 г/м<sup>3</sup> = 1 · 10<sup>-3</sup> кг/м<sup>3</sup>  
 Грамм на кубический сантиметр (g/cm<sup>3</sup>, г/см<sup>3</sup>); 1 г/см<sup>3</sup> = 1 · 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>  
 Килограмм-сила-секунда в квадрате на метр в четвертой степени (kgf·s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>, кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>); 1 кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup> = 9,80665 кг/м<sup>3</sup>  
 Тонна на кубический метр (t/m<sup>3</sup>, т/м<sup>3</sup>); 1 т/м<sup>3</sup> = 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>  
 Грамм на кубический фут (g/ft<sup>3</sup>, —); 1 грамм на кубический фут = 3,53 · 10<sup>-2</sup> кг/м<sup>3</sup>  
 Грамм на литр (g/l, г/л); 1 г/л = 1 кг/м<sup>3</sup>  
 Унция на кубический дюйм (oz/in<sup>3</sup>, —); 1 унция на кубический дюйм = 1,73 · 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>  
 Унция на кубический сантиметр (oz/cm<sup>3</sup>, —); 1 унция на кубический сантиметр = 2,835 · 10<sup>4</sup> кг/м<sup>3</sup>  
 Унция на кубический фут (—, —); 1 унция на кубический фут = 1,0014 кг/м<sup>3</sup>  
 Фунт на кубический фут (lb/ft<sup>3</sup>, —); 1 фунт на кубический фут = 16,0185 кг/м<sup>3</sup>

#### Линейная плотность

Текс (tex, текс); 1 текс = 1 · 10<sup>-6</sup> кг/м (точно)

#### Сила

Дина (dyn, дин); 1 дин = 1 · 10<sup>-5</sup> Н  
 Килограмм-сила (kgf, кгс); 1 кгс = 9,80665 Н (точно)  
 Килопонд (kp, —); 1 килопонд = 9,80665 Н (точно)  
 Паундаль (pdl, —); 1 паундаль = 0,138255 Н (точно)  
 Понд (p, —); 1 понд = 9,80665 · 10<sup>-3</sup> Н (точно)  
 Стен (sn, сн); 1 сн = 1 · 10<sup>3</sup> Н  
 Тонна-сила (—, тс); 1 тс = 9,80665 · 10<sup>3</sup> Н (точно)  
 Фунт-сила (lbf, —); 1 фунт-сила = 4,44822 Н

#### Поверхностное натяжение

Килограмм-сила на метр (kgf/m, кгс/м); 1 кгс/м = 9,80665 Н/м

#### Давление

Атмосфера (atm, атм); 1 атм = 1,01325 · 10<sup>5</sup> Па (точно)  
 Атмосфера техническая (килограмм-сила на квадратный сантиметр) (at, ат); 1 ат = 9,80665 · 10<sup>4</sup> Па (точно)

Бар (bar, бар); 1 бар = 1 · 10<sup>5</sup> Па  
 Дина на квадратный сантиметр (dyn/cm<sup>2</sup>, дин/см<sup>2</sup>); 1 дин/см<sup>2</sup> = 0,1 Па  
 Дюйм водяного столба (in H<sub>2</sub>O, —); 1 дюйм вод. столба = 249,089 Па  
 Дюйм ртутного столба (in Hg, —); 1 дюйм рт. ст. = 3386,39 Па  
 Килограмм-сила на квадратный метр (kgf/m<sup>2</sup>, кгс/м<sup>2</sup>); 1 кгс/м<sup>2</sup> = 9,80665 Па (точно)  
 Килограмм-сила на квадратный миллиметр (kgf/mm<sup>2</sup>, кгс/мм<sup>2</sup>); 1 кгс/мм<sup>2</sup> = 9,80665 · 10<sup>6</sup> Па  
 Килопонд на квадратный сантиметр (kp/cm<sup>2</sup>, —); 1 килопонд на кв. сантиметр = 9,80665 · 10<sup>4</sup> Па (точно)  
 Миллиметр водяного столба (mm H<sub>2</sub>O, мм вод. ст.); 1 мм вод. ст. = 9,80665 Па (точно)  
 Миллиметр ртутного столба (mm Hg, мм рт. ст.); 1 мм рт. ст. = 133,322 Па  
 Паундаль на квадратный фут (pdl/ft<sup>2</sup>, —); 1 паундаль на квадратный фут = 148816 Па  
 Пьеза (pz, пз); 1 пз = 1 · 10<sup>3</sup> Па  
 Тонна-сила на квадратный метр (tf/m<sup>2</sup>, тс/м<sup>2</sup>); 1 тс/м<sup>2</sup> = 9,80665 · 10<sup>3</sup> Па (точно)  
 Торр (Torr, —); 1 торр = 133,322 Па  
 Фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in<sup>2</sup>, —); 1 фунт-сила на квадратный дюйм = 6894,76 Па  
 Фут водяного столба (ft H<sub>2</sub>O, —); 1 фут вод. ст. = 2989,07 Па

#### Импульс (количество движения)

Грамм сантиметр в секунду (g·cm/s, г·см/с); 1 г·см/с = 10<sup>-5</sup> кг·м/с  
 Килограмм-сила-секунда (kgf·s, кгс·с); 1 кгс·с = 9,80665 кг·м/с  
 Тонна-метр в секунду (—, т·м/с); 1 т·м/с = 1 · 10<sup>3</sup> кг·м/с

#### Импульс силы

Килограмм-сила-секунда (kgf·s, кгс·с); 1 кгс·с = 9,80665 Н·с

#### Момент силы

Дина-сантиметр (dyn·cm, дин·см); 1 дин·см = 1 · 10<sup>-7</sup> Н·м  
 Килограмм-сила-метр (kgf·m, кгс·м); 1 кгс·м = 9,80665 Н·м (точно)  
 Килопонд-метр (kp·m, —); 1 килопонд-метр = 9,80665 Н·м (точно)  
 Стен-метр (sn·m, сн·м); 1 с·м = 1 · 10<sup>3</sup> Н·м  
 Фунт-сила-фут (lbf·ft, —); 1 фунт-сила-фут = 1,35582 Н·м



## Момент инерции

Грамм-сантиметр в квадрате ( $\text{g} \cdot \text{cm}^2$ ,  $\text{г} \cdot \text{см}^2$ );  $1 \text{ г} \cdot \text{см}^2 = 1 \times 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Килограмм-сила-секунда в квадрате на метр ( $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ ,  $\text{кгс} \times \text{с}^2/\text{м}$ );  $1 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м} = 9,80665 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

## Момент импульса (момент количества движения)

Грамм-квадратный сантиметр на секунду ( $\text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\text{г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$ );  $1 \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

Килограмм-сила-метр-секунда ( $\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ ,  $\text{кгс} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ );  $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} \cdot \text{с} = 9,80665 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

Тонна-метр в квадрате на секунду ( $-, \text{т} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ );  $1 \text{ т} \cdot \text{м}^2/\text{с} = 1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

## Напряжение (механическое)

Килограмм-сила на квадратный миллиметр ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ,  $\text{кгс}/\text{мм}^2$ );  $1 \text{ кгс}/\text{мм}^2 = 9,80665 \cdot 10^6 \text{ Па}$  (точно)

Килопонд на квадратный миллиметр ( $\text{kp}/\text{mm}^2$ ,  $-, \text{кп}/\text{мм}^2$ );  $1 \text{ килопонд на кв. мм} = 9,80665 \cdot 10^6 \text{ Па}$  (точно)

## Работа, энергия

Ватт-час ( $\text{W} \cdot \text{h}$ ,  $\text{Вт} \cdot \text{ч}$ );  $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж}$

Киловатт-час ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,  $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ );  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$

Килограмм-сила-метр ( $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ,  $\text{кгс} \cdot \text{м}$ );  $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,80665 \text{ Дж}$

Килопонд-метр ( $\text{kp} \cdot \text{m}$ ,  $-, \text{кп} \cdot \text{м}$ );  $1 \text{ килопонд-метр} = 9,80665 \text{ Дж}$

Литр-атмосфера ( $-, \text{л} \cdot \text{атм}$ );  $1 \text{ л} \cdot \text{атм} = 101,328 \text{ Дж}$

Лошадиная сила-час ( $-, \text{л.с.} \cdot \text{ч}$ );  $1 \text{ л.с.} \cdot \text{ч} = 2,64780 \cdot 10^6 \text{ Дж}$

Ридберг ( $\text{Ry}$ ,  $-, \text{ридберг}$ );  $1 \text{ ридберг} = 2,1796 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,60 \text{ эВ}$

Фут-фунт-сила ( $\text{ft} \cdot \text{lbf}$ ,  $-, \text{фут-фунт-сила}$ );  $1 \text{ фут-фунт-сила} = 1,35582 \text{ Дж}$

Фут-паундаль ( $\text{ft} \cdot \text{pdl}$ ,  $-, \text{фут-паундаль}$ );  $1 \text{ фут-паундаль} = 0,0421401 \text{ Дж}$

Электрон-вольт ( $\text{eV}$ ,  $\text{эВ}$ );  $1 \text{ эВ} = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Эрг ( $\text{erg}$ ,  $\text{эрг}$ );  $1 \text{ эрг} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$

## Удельная работа технологических аппаратов

Лошадиная сила-час на килограмм ( $-, \text{л.с.} \cdot \text{ч}/\text{кг}$ );  $1 \text{ л.с.} \cdot \text{ч}/\text{кг} = 2,64780 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$

## Мощность

Калория в секунду ( $\text{cal/s}$ ,  $\text{кал}/\text{с}$ );  $1 \text{ кал}/\text{с} = 4,1868 \text{ Вт}$

Килограмм-сила-метр в секунду ( $\text{kgf} \cdot \text{m/s}$ ,  $\text{кгс} \cdot \text{м}/\text{с}$ );  $1 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{с} = 9,80665 \text{ Вт}$

Лошадиная сила ( $-, \text{л.с.}$ );  $1 \text{ л.с.} = 735,499 \text{ Вт}$

Лошадиная сила (Брит.) ( $\text{hp}$ ,  $-, \text{лошадиная сила (Брит.)}$ );  $1 \text{ лошадиная сила (Брит.)} = 745,700 \text{ Вт}$

Фут-паундаль на секунду ( $\text{ft} \cdot \text{pdl/s}$ ,  $-, \text{фут-паундаль на секунду}$ );  $1 \text{ фут-паундаль на секунду} = 0,0421401 \text{ Вт}$

Фут-фунт-сила на секунду ( $\text{ft} \cdot \text{lbf/s}$ ,  $-, \text{фут-фунт-сила на секунду}$ );  $1 \text{ фут-фунт-сила на секунду} = 1,35582 \text{ Вт}$

Эрг в секунду ( $\text{erg/s}$ ,  $\text{эрг}/\text{с}$ );  $1 \text{ эрг}/\text{с} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$

## Динамическая вязкость

Килограмм-сила-секунда на квадратный метр ( $\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,  $\text{кгс} \times \text{с}/\text{м}^2$ );  $1 \text{ кгс} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = 9,80665 \text{ Па} \cdot \text{с}$

Паундаль-секунда на квадратный фут ( $\text{pdl} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$ ,  $-, \text{паундаль-секунда на кв. фут}$ );  $1 \text{ паундаль-секунда на кв. фут} = 1,48816 \text{ Па} \cdot \text{с}$

Пуаз ( $\text{P}$ ,  $\text{П}$ );  $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$

Фунт-сила-секунда на квадратный фут ( $\text{lbf} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$ ,  $-, \text{фунт-сила-секунда на кв. фут}$ );  $1 \text{ фунт-сила-секунда на кв. фут} = 47,8803 \text{ Па} \cdot \text{с}$

## Кинематическая вязкость

Квадратный метр на час ( $\text{m}^2/\text{h}$ ,  $\text{м}^2/\text{ч}$ );  $1 \text{ м}^2/\text{ч} = 2,777 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

Квадратный фут на секунду ( $\text{ft}^2/\text{s}$ ,  $-, \text{кв. фут на секунду}$ );  $1 \text{ кв. фут на секунду} = 0,092903 \text{ м}^2/\text{с}$

Квадратный фут на час ( $\text{ft}^2/\text{h}$ ,  $-, \text{кв. фут на час}$ );  $1 \text{ кв. фут на час} = 2,58064 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Стокс ( $\text{St}$ ,  $\text{Ст}$ );  $1 \text{ Ст} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

## Ударная вязкость

Эрг на квадратный сантиметр ( $\text{erg}/\text{cm}^2$ ,  $\text{эрг}/\text{см}^2$ );  $1 \text{ эрг}/\text{см}^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/\text{м}^2$

## Текучесть

Пуаз в минус первой степени ( $\text{P}^{-1}$ ,  $\text{П}^{-1}$ );  $1 \text{ П}^{-1} = 1 \cdot 10 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$

## Количество теплоты

Британская тепловая единица ( $\text{Btu}$ ,  $-, \text{британская тепловая единица}$ );  $1 \text{ британская тепловая единица} = 1,05506 \cdot 10^3 \text{ Дж}$



## Электричество и магнетизм

### Электрический заряд<sup>1</sup>

Фарадей (F, Ф); 1 Ф = 96484,56 Кл  
Франклин (Fr, Фр); 1 Фр =  $3,33564 \cdot 10^{-10}$  Кл  
Ампер-час (Ah, А·ч); 1 А·ч =  $3,6 \cdot 10^3$  Кл

### Электрический момент

Дебай (D, Д); 1 Д =  $3,33564 \cdot 10^{-30}$  Кл·м

### Напряженность электрического поля

Вольт на сантиметр (V/cm, В/см); 1 В/см = 100 В/м  
Киловольт на сантиметр (kV/cm, кВ/см); 1 кВ/см =  $10^5$  В/м

### Плотность электрического тока

Ампер на квадратный миллиметр (A/mm<sup>2</sup>, А/мм<sup>2</sup>); 1 А/мм<sup>2</sup> =  $1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>

### Удельное электрическое сопротивление

Ом-квадратный миллиметр на метр ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , Ом·мм<sup>2</sup>/м);  
1 Ом·мм<sup>2</sup>/м =  $1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м  
Ом-сантиметр ( $\Omega \cdot \text{cm}$ , Ом·см); 1 Ом·см = 0,01 Ом·м

### Удельная электрическая проводимость

Ом в минус первой степени-сантиметр в минус первой степени  
( $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>); 1 Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> = 100 См/м  
Метр на ом-квадратный миллиметр [ $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$ , м/(Ом·мм<sup>2</sup>)];  
1 м/(Ом·мм<sup>2</sup>) =  $1 \cdot 10^6$  Ом/м

### Магнитная индукция

Гаусс (Gs, Гс); 1 Гс =  $1 \cdot 10^{-4}$  Тл  
Вебер на квадратный сантиметр (Wb/cm<sup>2</sup>, Вб/см<sup>2</sup>); 1 Вб/см<sup>2</sup> =  $1 \cdot 10^4$  Тл

### Магнитный поток

Максвелл (Mx, Мкс); 1 Мкс =  $1 \cdot 10^{-8}$  Вб

<sup>1</sup> Соотношение электрических и магнитных единиц системы СГС с соответствующими единицами СИ см. в табл. 8.

Калория международная<sup>1</sup> (cal, кал); 1 кал = 4,1868 Дж (точно)\*  
Калория пятнадцатиградусная (cal<sub>15</sub>, кал<sub>15</sub>); 1 кал<sub>15</sub> = 4,1855 Дж  
Калория термодинамическая (—, кал<sub>15</sub>); 1 кал<sub>15</sub> = 4,1840 Дж  
Термия (th, —); 1 термия =  $4,1868 \cdot 10^3$  Дж  
Эрг (erg, эрг); 1 эрг =  $1 \cdot 10^{-7}$  Дж

### Теплоемкость. Энтропия

Калория на градус Цельсия (cal/°C, кал/°C); 1 кал/°C = 4,1868 Дж/К  
Эрг на кельвин (erg/K, эрг/К); 1 эрг/К =  $1 \cdot 10^{-7}$  Дж/К

### Удельная теплоемкость

Калория на грамм-градус Цельсия [cal/(g·°C), кал/(г·°C)];  
1 кал/(г·°C) =  $4,1868 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К)  
Килокалория на килограмм-градус Цельсия [kcal/(kg·°C),  
ккал/(кг·°C)]; 1 ккал/(кг·°C) =  $4,1868 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К)  
Эрг грамм-кельвин (erg/(g·K), эрг/(г·К)); 1 эрг/(г·К) =  $1 \times 10^{-4}$  Дж/(кг·К)

### Молярная теплоемкость. Молярная энтропия

Калория на моль-градус Цельсия [cal/(mol·°C), кал/(моль·°C)];  
1 кал/(моль, °C) = 4,1868 Дж/(моль·К)

### Тепловой поток

Калория в секунду (cal/s, кал/с); 1 кал/с = 4,1868 Вт  
Килокалория в час (kcal/h, ккал/ч); 1 ккал/ч = 1,163 Вт  
Эрг в секунду (erg/s, эрг/с); 1 эрг/с =  $1 \cdot 10^{-7}$  Вт

### Теплопроводность

Британская тепловая единица в секунду на фут-градус  
Фаренгейта [Btu/(s·ft·degF, —)]; 1 британская тепловая единица в секунду  
на фут-градус Фаренгейта =  $6,23064 \cdot 10^3$  Вт/(м·К)  
Калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия [cal/(s·cm·°C),  
кал/(с·см·°C)]; 1 кал/(с·см·°C) =  $4,1868 \cdot 10^2$  Вт/(м·К)  
Килокалория в час на метр-градус Цельсия [kcal/(h·m·°C),  
ккал/(ч·м·°C)]; 1 ккал/(ч·м·°C) = 1,163 Вт/(м·К)  
Эрг в секунду на сантиметр-Кельвин [erg/(s·cm·K), эрг/(с·см·К)];  
1 эрг/(с·см·К) =  $1 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·К)

<sup>1</sup> Приведенное соотношение между калорией и джоулем установлено 5-й Международной конференцией по свойствам водяного пара и является определением Международной калории (см. ГОСТ 8550—61)



*Напряженность магнитного поля*

Ампер на сантиметр (А/см, А/см);  $1 \text{ А/см} = 100 \text{ А/м}$   
Ампер-виток на сантиметр (—, Ав/см);  $1 \text{ Ав/см} = 100 \text{ А/м}$   
Эрстед (Ое, Э);  $1 \text{ Э} = 79,5775 \text{ А/м}$

*Магнитодвижущая сила. Разность магнитных потенциалов*

Ампер-виток (—, А-в);  $1 \text{ Ав} = 1 \text{ А}$   
Гильберт (Gb, Гб);  $1 \text{ Гб} = 0,795775 \text{ А}$

*Магнитный момент*

Магнетон Бора ( $\mu_B$ ,  $\mu_B$ );  $1 \mu_B = 9,2740154 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$   
Ядерный магнетон (—,  $\mu_{яд}$ );  $1 \mu_{яд} = 5,0507866 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$

**Акустика**

*Звуковое давление*

Дина на квадратный сантиметр ( $\text{дин/см}^2$ ,  $\text{дин/см}^2$ );  $1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$

*Акустическое сопротивление*

Дина-секунда на сантиметр в пятой степени ( $\text{дин} \cdot \text{с/см}^5$ ,  $\text{дин} \cdot \text{с/см}^5$ );  $1 \text{ дин} \cdot \text{с/см}^5 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$

*Удельное акустическое сопротивление*

Дина-секунда на сантиметр в кубе ( $\text{дин} \cdot \text{с/см}^3$ ,  $\text{дин} \cdot \text{с/см}^3$ );  $1 \text{ дин} \cdot \text{с/см}^3 = 1 \cdot 10 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$

*Механическое сопротивление*

Дина-секунда на сантиметр ( $\text{дин} \cdot \text{с/см}$ ,  $\text{дин} \cdot \text{с/см}$ );  $1 \text{ дин} \cdot \text{с/см} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с/м}$

*Звуковая энергия*

Эрг (erg, эрг);  $1 \text{ эрг} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$

*Плотность звуковой энергии*

Эрг на кубический сантиметр ( $\text{эрг/см}^3$ ,  $\text{эрг/см}^3$ );  $1 \text{ эрг/см}^3 = 0,1 \text{ Дж/м}^3$

*Поток звуковой энергии. Мощность звуковой энергии*

Эрг в секунду (erg/s, эрг/с);  $1 \text{ эрг/с} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$

*Интенсивность звука*

Эрг в секунду на квадратный сантиметр [ $\text{эрг/(с} \cdot \text{см}^2)$ ,  $\text{эрг/(с} \cdot \text{см}^2)$ ];  $1 \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^2) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$

*Объемная скорость*

Кубический сантиметр в секунду ( $\text{см}^3/\text{с}$ ,  $\text{см}^3/\text{с}$ );  $1 \text{ см}^3/\text{с} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$

**Оптика**

*Сила света*

Свеча (—, св);  $1 \text{ св} = 1,005 \text{ кд}$

*Световая энергия*

Люмен-час ( $\text{лм} \cdot \text{ч}$ ,  $\text{лм} \cdot \text{ч}$ );  $1 \text{ лм} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ лм} \cdot \text{с}$

*Светимость*

Радфот (radph, радфот);  $1 \text{ радфот} = 1 \cdot 10^4 \text{ лм/м}^2$

*Освещенность*

Фот (ph, фот);  $1 \text{ фот} = 1 \cdot 10^4 \text{ лк}$

*Яркость*

Стильб (sb, сб);  $1 \text{ сб} = 1 \cdot 10^4 \text{ кд/м}^2$   
Апостильб (Asb, асб);  $1 \text{ асб} = 0,319 \text{ кд/м}^2$   
Ламберт (L, Лб);  $1 \text{ Лб} = 3,19 \cdot 10^3 \text{ кд/м}^2$

*Световая экспозиция*

Фот-секунда ( $\text{ph} \cdot \text{с}$ ,  $\text{фот} \cdot \text{с}$ );  $1 \text{ фот} \cdot \text{с} = 1 \cdot 10^4 \text{ лк} \cdot \text{с}$

*Объемная плотность световой энергии*

Люмен-секунда на кубический сантиметр ( $\text{лм} \cdot \text{с/см}^3$ ,  $\text{лм} \cdot \text{с/см}^3$ );  $1 \text{ лм} \cdot \text{с/см}^3 = 1 \cdot 10^6 \text{ лм} \cdot \text{с/м}^3$



### Энергия излучения

Эрг (erg, эрг);  $1 \text{ эрг} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$

### Поток излучения

Эрг/с (erg/s, эрг/с);  $1 \text{ эрг/с} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$

### Сила излучения

Эрг в секунду на стерадиан [erg/(s · sr), эрг/(с · ср)];  $1 \text{ эрг/(с · ср)} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/ср}$

### Энергетическая светимость. Энергетическая освещенность. Облученность

Эрг в секунду на квадратный сантиметр [erg/(s · cm<sup>2</sup>), эрг/(с · см<sup>2</sup>)];  $1 \text{ эрг/(с · см}^2) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$

### Энергетическое освечивание

Эрг на стерадиан (erg/sr, эрг/ср);  $1 \text{ эрг/ср} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/ср}$

### Энергетическая экспозиция

Эрг на квадратный сантиметр (erg/cm<sup>2</sup>, эрг/см<sup>2</sup>);  $1 \text{ эрг/см}^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$

### Энергетическая яркость

Эрг в секунду на стерадиан-квадратный сантиметр [erg/(s · sr × cm<sup>2</sup>), эрг/(с · ср · см<sup>2</sup>)];  
 $1 \text{ эрг/(с · ср · см}^2) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(ср · м}^2)$

### Объемная плотность силы излучения

Эрг в секунду на стерадиан-кубический сантиметр [erg/(s · sr × cm<sup>3</sup>), эрг/(с · ср · см<sup>3</sup>)];  
 $1 \text{ эрг/(с · ср · см}^3) = 1 \cdot 10^{-1} \text{ Вт/(ср · м}^3)$

### Интегральная энергетическая яркость

Эрг на стерадиан-квадратный сантиметр [erg/(sr · cm<sup>2</sup>), эрг/(ср · см<sup>2</sup>)];  
 $1 \text{ эрг/(ср · см}^2) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/(ср · м}^2)$

### Ионизирующие излучения

#### Поглощенная доза ионизирующего излучения. Керма

Рад (rad, рад);  $1 \text{ рад} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$

#### Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения. Мощность кермы

Рад в секунду [(rad/s, рад/с)];  $1 \text{ рад/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр/с}$   
Грей в минуту (Gy/min, Гр/мин);  $1 \text{ Гр/мин} = 1,666 \cdot 10^{-2} \text{ Гр/с}$

#### Эквивалентная доза ионизирующего излучения

Бэр (rem, бэр);  $1 \text{ бэр} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}$

#### Мощность эквивалентной дозы ионизирующего излучения

Бэр в секунду (rem/s, бэр/с);  $1 \text{ бэр/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв/с}$   
Микрозиверт в час (μSv/h, мкЗв/ч);  $1 \text{ мкЗв/ч} = 0,27777 \cdot 10^{-9} \text{ Зв/с}$

#### Экспозиционная доза фотонного излучения

Рентген (R, Р);  $1 \text{ Р} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$

#### Активность радионуклида в источнике

Кюри (Ci, Ки);  $1 \text{ Ки} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$

#### Удельная активность источника

Кюри на килограмм (Ci/kg, Ки/кг);  $1 \text{ Ки/кг} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ Бк/кг}$

#### Поверхностная активность источника

Кюри на квадратный сантиметр (Ci/cm<sup>2</sup>, Ки/см<sup>2</sup>);  $1 \text{ Ки/см}^2 = 3,70 \cdot 10^{14} \text{ Бк/м}^2$

#### Объемная активность источника

Кюри на литр (Ci/L, Ки/л);  $1 \text{ Ки/л} = 3,70 \cdot 10^{13} \text{ Бк/м}^3$

#### Молярная активность источника

Кюри на моль (Ci/mol, Ки/моль);  $1 \text{ Ки/моль} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк/моль}$



12. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множи- тель	Приставка	Обозначение приставки		Множи- тель	Приставка	Обозначение приставки	
		меж- дуна- родное	рус- ское			меж- дуна- родное	рус- ское
$10^{18}$	экса	E	Э	$10^{-1}$	деци	d	д
$10^{15}$	пета	P	П	$10^{-2}$	сан- ти	c	с
$10^{12}$	тера	T	Т	$10^{-3}$	милли	m	м
$10^9$	гига	G	Г	$10^{-6}$	микро	$\mu$	мк
$10^6$	мега	M	М	$10^{-9}$	нано	n	н
$10^3$	кило	k	к	$10^{-12}$	пико	p	п
$10^2$	гекто	h	г	$10^{-15}$	фемто	f	ф
$10^1$	дека	da	да	$10^{-18}$	атто	a	а

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аракелян Г. Б. Фундаментальные безразмерные величины. Ереван, 1981.
- [2] Артемьев Б. Г., Голубев С. М. Справочное пособие для работников метрологических служб. М., 1982.
- [3] Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. М., 1975.
- [4] Бурдун Г. Д. Справочник по международной системе единиц. 3-е изд. М., 1976.
- [5] Голубищев О. М. Механические величины в Международной системе единиц. М., 1983.
- [6] Гордов А. Н. Температурные шкалы. М., 1966.
- [7] ГОСТ 1493—47. Обозначения основных общетехнических величин. М., 1964.
- [8] ГОСТ 1494—77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. М., 1978.
- [9] ГОСТ 1497—84 (СТ СЭВ 471—77). Металлы. Методы испытаний на растяжение. М., 1985.
- [10] ГОСТ 5197—85 (СТ СЭВ 4751—84, СТ СЭВ 4839—84, СТ СЭВ 4840—84). Вакуумная техника. Термины и определения. М., 1986.
- [11] ГОСТ 7427—76. Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения. М., 1977.
- [12] ГОСТ 7601—78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин. М., 1979.
- [13] ГОСТ 8.157—75. Шкалы температурные практические. М., 1986.
- [14] ГОСТ 8.057—80. ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения. М., 1980.
- [15] ГОСТ 8849—58. Акустические единицы. М., 1959.
- [16] ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78). ГСИ. Единицы физических величин. М., 1981.
- [17] ГОСТ 15484—81. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. М., 1981.
- [18] ГОСТ 15855—77. Измерение времени и частоты. Термины и определения. М., 1978.
- [19] ГОСТ 16263—70. ГСИ. Метрология. Термины и определения. М., 1970.
- [20] ГОСТ 19693—74. Материалы магнитные. Термины и определения. М., 1974.
- [21] ГОСТ 19880—74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. М., 1976.
- [22] ГОСТ 21515—76. Материалы диэлектрические. Термины и определения. М., 1977.
- [23] ГОСТ 23778—79. Измерения оптические поляризационные. Термины и определения. М., 1979.
- [24] ГОСТ 24284—80 (СТ СЭВ 1459—78). Гравиразведка и магниторастворка. Термины и определения. М., 1980.
- [25] ГОСТ 24346—80 (СТ СЭВ 1926—79). Вибрация. Термины и определения. М., 1980.



- [26] ГОСТ 24347—80 (СТ СЭВ 1927—79). Вибрация. Обозначения и единицы величин. М., 1980.
- [27] ГОСТ 26148—84. Фотометрия. Термины и определения. М., 1984.
- [28] Деллаф А. А., Яворский Б. М., Милковская Л. Б. Курс физики. Ч. 1. М., 1973.
- [29] Еришов В. С. Внедрение Международной системы единиц. М., 1986.
- [30] Иванов В. И. Курс дозиметрии. 3-е изд. М., 1978.
- [31] Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. М., 1980.
- [32] Маликов С. Ф., Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М., 1965.
- [33] Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МІТШ-68). М., 1976.
- [34] Международный союз чистой и прикладной физики (J.U.P. A.P.) Обозначения, единицы измерения и терминология в физике. Документ U.J.P. 20 (1978)//УФН, 1979. Т. 129, вып. 2.
- [35] Международный стандарт ИСО 31/0. Общее введение к ИСО 31. Общие положения, относящиеся к величинам, единицам и обозначениям.
- [36] Международный стандарт ИСО 31/1. Величины и единицы пространства и времени.
- [37] Международный стандарт ИСО 31/4. Величины и единицы теплоты.
- [38] Международный стандарт ИСО 31/5. Величины и единицы электричества и магнетизма.
- [39] Международный стандарт ИСО 31/6. Величины и единицы света и связанных с ним электромагнитных излучений.
- [40] Международный стандарт ИСО 31/8. Физическая химия и молекулярная физика.
- [41] Международный стандарт ИСО 31/9. Величины и единицы атомной и ядерной физики.
- [42] Международный стандарт ИСО 31/10. Ядерные реакции и ионизирующие излучения. Величины и единицы.
- [43] Международный стандарт ИСО 31/12. Безразмерные параметры.
- [44] Международный стандарт ИСО 31/13. Величины и единицы физики твердого тела.
- [45] Международный стандарт ИСО 921—72. Ядерная энергия. Словарь терминов.
- [46] Международный стандарт МЭК 50(801)—84. Акустика и электроакустика.
- [47] МИ 221—80. Методика внедрения СТ СЭВ 1052—78. Метрология. Единицы физических величин в области измерений давления, силы и теплофизических измерений.
- [48] Новосильцев В. Н. К истории основных единиц СИ. Ростов н/Д, 1975.
- [49] Ожигов И. Е. Терминология квантовой теории твердого тела//Науч.-техн. терминология. 1985. Вып. 2. С. 12—15.
- [50] Олейникова Л. Д. Единицы физических величин в энергетике. М., 1983.
- [51] ОСТ 34-9-350—77. Единицы физических величин в энергетике.
- [52] Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов: Справочник. М., 1986.
- [53] РД 50-160—79. Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78. Метрология. Единицы физических величин.

- [54] РД 50—454—84. Методические указания «Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81. Единицы физических величин в области ионизирующих излучений». М., 1984.
- [55] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 83. Теория теплообмена. Терминология. М., 1971.
- [56] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 89. Ускорение заряженных частиц.
- [57] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 98. Буквенные обозначения основных величин гидромеханики. М., 1980.
- [58] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 102. Теоретическая механика. Терминология. Буквенные обозначения. М., 1984.
- [59] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 103. Термодинамика. Основные понятия. Терминология. Буквенные обозначения величин. М., 1984.
- [60] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 104. Квантовая механика. Терминология. М., 1985.
- [61] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 105. Квантовая теория твердого тела. Терминология. М., 1985.
- [62] Сборники рекомендуемых терминов КНТТ АН СССР. Вып. 106. Механические колебания. Основные понятия. Терминология. Буквенные обозначения. М., 1987.
- [63] Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1. М., 1977.
- [64] Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. 3-е изд. М., 1988.
- [65] Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1. М., 1974.
- [66] Советский энциклопедический словарь. М., 1981.
- [67] Справочная книга редактора и корректора/Под ред. А. Э. Мильчина. 3-е изд. М., 1985.
- [68] Стандарт СЭВ 1052—78. Метрология. Единицы физических величин. М., 1978.
- [69] Стоцкий Л. Р. Физические величины и их единицы. М., 1984.
- [70] Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М., 1976.
- [71] Физика микромира. Маленькая энциклопедия. М., 1983.
- [72] Физический энциклопедический словарь. М., 1983.
- [73] Фридрихов С. А., Мовнин С. М. Физические основы электронной техники. М., 1982.
- [74] Чаплыгин С. А., Лотте Д. С. Задачи и методы работы по упорядочению технической терминологии//Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1937. № 6.
- [75] Чертов А. Г. Единицы физических величин. М., 1977.
- [76] Широков К. П. Общие вопросы метрологии. М., 1967.
- [77] Широков К. П., Богуславский М. Г. Международная система единиц. М., 1984.
- [78] Широков К. П., Балалаев В. А., Селиванов П. Н. 100 лет метрической конвенции. М., 1975.
- [79] Щегель А. Б. Основные термины метрологии в связи с введением ГОСТ 16263—70: Лекции по курсу «Основы метрологии». Ростов н/Д, 1977.
- [80] Юдин М. Ф., Селиванов М. Н., Тищенко О. Ф., Скороходов А. И. Основные термины в области метрологии. Словарь-справочник/Под ред. Ю. В. Тареева. М., 1989.



## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аберрация 196, 197  
 Абсорбция 203  
 Активность радионуклида в источнике 258—261  
 — оптическая 186  
 Ампер 118, 134, 135  
 Ампер-секунда 106  
 Ампер-час 106  
 Амплитуда 143, 144, 265  
 Ангстрем 312  
 Антивещество 220  
 Античастица 220  
 Астигматизм 196  
 Астрономическая единица 42  
 Атомная единица массы 315  
  
 Бар 317  
 Барионы 221  
 Барн 249, 312  
 Барьер потенциальный 273  
 Беккерель 259  
 Бел 164  
 Бозоны 222, 265  
  
 Вакуум 201  
 Ватт 74, 94, 160, 172  
 Вебер 129  
 Век 49  
 Вектор излучения магнитный 154  
 — — электрический 154  
 — Пойнтинга 154  
 Величина 9  
 — безразмерная 23  
 — однородная 11  
 — основная 20  
 — производная 20  
 — физическая 9  
 Вес 78  
 — статистический 194, 229  
 — удельный 79  
 Взаимодействие сильное 228  
 — слабое 229  
 Вместимость 43  
 Вольт 119

Восприимчивость диэлектрическая абсолютная 113  
 — — относительная 114  
 — магнитная 131  
 Вращение вещества удельное 187, 188  
 Время 38, 46, 49  
 — атомное 50  
 — жизни 238  
 Вырождение уровня 266  
 Вязкость динамическая 69  
 — кинематическая 69  
  
 Гал 56  
 Гамильтониан 266  
 Гамма (звукоряд) 167  
 Гектар 43  
 Генри (единица индуктивности) 132, 136  
 Генри (единица магнитной проводимости) 136  
 Герц 143  
 Гильберт 322  
 Гиперзвук 156  
 Гипероны 222  
 Год 49  
 Гравитон 223  
 Град, гон (единица плоского угла) 44  
 Градиент температурный 93  
 Градус угловой 44  
 — Цельсия 91, 314  
 Грей 252, 254  
  
 Давление 66  
 — звуковое 159  
 — осмотическое 217  
 Дата 49  
 Действие 223  
 Дейтрон 229  
 Декремент колебаний 146  
 Децибел 164  
 Джоуль 73, 94, 98, 100, 171, 215, 297  
 Диамагнетизм, 276

Диамагнетик 126  
 Дина 297, 316  
 Динама 81  
 Диоптрия 199  
 Длина волны 152, 153  
 Добротность 146  
 Домен 126  
 Дырка 267, 280

Единицы внесистемные 34  
 — дольные 27, 291  
 — дополнительные 26, 45  
 — кратные 26, 291  
 — логарифмические 162—165  
 — основные 26  
 — производные когерентные 26, 290  
 Емкость электрическая 115  
  
 Же-фактор (g-фактор) протона 236  
 Жесткость динамическая 145  
 — комплексная 145

Заряд барионный 221  
 — электрический 103, 106  
 — — элементарный 103, 233  
 Звукоряд 167  
 Зиверт 257

Избыток массы 238  
 Излучатель полный 179  
 Излучательность 14  
 Излучение комптоновское 242  
 — Черенкова 223  
 Изображение оптическое 196  
 Изотопы 223  
 JJ-связь 267  
 Импеданс акустический 161  
 Импульс 71  
 Индексы буквенного обозначения 15  
 Индуктивность 131  
 Индукция магнитная 128  
 Инертность 58  
 Интенсивность звука 160  
 — излучения 153  
 Инфразвук 156

Кандела 178, 180  
 Каоны 220  
 Квазиимпульс 281  
 Квазичастица 223, 281  
 Квантование 266, 268, 281  
 Квантовые числа 223, 236, 268  
 Квантовый переход 224

Кванты 223  
 Кварки 224, 233  
 Кельвин 88, 90, 91  
 Керма 254, 255  
 Килограмм 27, 59  
 Килограмм-сила 29  
 Количество вещества 205  
 — движения 71,  
 — теплоты 94, 101  
 — электричества 106  
 Конденсация 86  
 Концентрация компонента массовая 211  
 — молекул (частиц) 211  
 — молярная 212  
 Коэффициент диффузии 209  
 — ослабления 245, 250  
 — действия полезного 75, 100  
 — Пуассона 97  
 — температурный 93  
 — — давления 93  
 — — расширения линейного 93  
 — — — объемного 93  
 — — сопротивления электрического 124  
 — теплообмена 96  
 — теплопередачи 96  
 — теплопроводности 95  
 — упаковки 238  
 — Эйнштейна для испускания вынужденного 195  
 — — — поглощения 194  
 Кривизна кривой в точке 45  
 — поверхности средняя 46  
 Кривые уровней громкости 166  
 Кулон единица заряда электрического 106  
 — — потока электрического смещения 110  
 Кюри 259

Лептоны 225  
 Летучесть (фугитивность) 216, 217  
 Литр 43  
 Лучистость 14  
 Люкс 182  
 Люмен 181

Магнетик 126  
 Магнетон Бора 235  
 — ядерный 235  
 Магنون 269  
 Масса 59  
 — молярная 207  
 — покоя частицы 233



Масса эффективная 282  
 Мезоны 225  
 Мел 168  
 Месяц 49  
 Металл 282, 284  
 Метод Бринелля 70  
 — Виккерса 70  
 — Хартри 270  
 Метр 27, 38  
 «Метр Архивный» 39  
 Миграция 203  
 Миля морская 42  
 Минута (единица времени) 49  
 — (единица плоского угла) 44  
 Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц 326  
 Модули упругости 67, 68  
 Молекула 226  
 Молярность 212  
 Молярность 212  
 Момент импульса 72  
 — магнитный амперовский 130, 131  
 — — кулоновский 131  
 — угловой 72  
 — электрический дипольный 111,  
 — ядерный квадрупольный 236, 237  
 Мощность 74  
 Мюоны 226  
  
 Наблюдаемая 271  
 Намагниченность 131  
 Натяжение поверхностное 70  
 Неделя 49  
 Нейтрино 226  
 Нейтрон 226  
 Непер 104, 327  
 Нит 178  
 Нуклид 226  
 Нуклоны 226  
 Ньютон 61  
  
 Обертон 167  
 Облученность 14, 173  
 Обозначения единиц физических величин 297  
 — физических величин 14, 15, 16  
 Объем 43  
 — молярный 207  
 — сосуда 43  
 Октава 168  
 Ом 122

Определение физической величины 9  
 Освечивание 182  
 Освещенность 182  
 Остаток атомный (атомный остров) 265  
 Ось оптическая 197  
 Отношение гиромагнитное 231  
 Отражение 155  
  
 Парамагнетизм 284  
 Парамагнетик 126  
 Параметр порядка в теории сверхпроводимости 284  
 — термодинамический 88  
 Парсек 42  
 Паскаль 66, 67  
 Перемещение точки элементарное 53  
 — угловое 57  
 Перенос ионизирующих частиц 244  
 — ионизирующего излучения 246  
 Переход квантовый 224  
 Период колебаний 143  
 — полураспада 239  
 Пи-мезоны 227  
 Плечо силы 62  
 Плотность 60  
 — заряда электрического 107, 108  
 — потока излучения ионизирующего 247  
 — — теплового 94  
 — спектральная светимости энергетической 176, 177  
 — — яркости энергетической 178  
 — состояний 284  
 — тока электрического 121  
 — энергии звуковой 159  
 — — излучения объемная 171  
 Площадь 42  
 Поверхность волновая 148  
 Поглощение 151  
 Подвижность ионов 213  
 Позитрон 227  
 Позитроний 227  
 Показатель адиабаты 97  
 — ослабления 192  
 — поглощения 192  
 — преломления 188  
 — размерности 22  
 — рассеяния 192  
 — усиления 194

Поле гравитационное 76, 77  
 Полуметалл 284  
 Полупроводник 117, 284  
 Поляризованность 111  
 Поляризуемость 114  
 Порог болевого ощущения 166  
 Постоянная Авогадро 205  
 — Больцмана 312  
 — Вина 178  
 — магнитная 132  
 — молярная газовая 208  
 — Планка 233  
 — распада радиоактивного 262  
 — Ридберга 234  
 — тонкой структуры 233  
 — Фарадея 235  
 — электрическая 112  
 — эмиссионная 125  
 Потенциал химический 215  
 — электрический 114  
 Поток излучения 171  
 — — ионизирующего 246  
 — магнитный 129  
 — световой 180  
 — смещения 110  
 — тепловой 94  
 — частиц ионизирующих 243  
 Потокосцепление 130  
 Пояс часовой 50  
 Прецессия 53  
 Пробой 105  
 Проводимость 122, 123, 136, 217  
 Продолжительность жизни радионуклида 263  
 Пространство 38, 198, 274, 276  
  
 Работа 73  
 Рад 297, 325  
 Радиан 26, 44, 45, 142, 144  
 Радиоактивность 228  
 Радионуклид 228  
 Радиус боровский 234  
 — кривизны 45  
 — электрона классический 234  
 — ядра 235  
 Размах 144  
 Размер физической величины 10  
 — единицы физической величины 27  
 Размерность физической величины 21  
 Разность хода оптическая 190  
 Рассеяние 151, 228, 270, 276  
 Расстояние фокусное 199  
 Рационализация уравнений поля электромагнитного 136

Реверберация 157  
 Резонанс 142  
 Резонансы 228  
 Релаксация 205  
 Рентген 256  
 Ридберг 234  
  
 Савар 168  
 Самоиндукция 127  
 Сверхпроводимость 117, 286  
 Свет 169  
 Светимость 182  
 — энергетическая 14, 173  
 Световой год 42  
 Свеча 178  
 Сегнетоэлектрик 105, 286  
 Секунда, единица времени 47, 48, 50  
 — единица плоского угла 44  
 Сечение 247  
 — взаимодействия частиц ионизирующих 247—249, 267, 272  
 Сила 61  
 — излучения 14, 172  
 — Лоренца 128  
 — магнитодвижущая 134  
 — света 178  
 — оптическая 199  
 — тока электрического 117  
 — тяжести 75  
 — электродвижущая 120  
 Сименс 122  
 Синонимия 13, 14  
 Система величин 19, 20  
 — Гаусса 27  
 — единиц физических величин  
 Система Международная 33, 107, 118  
 Системы единиц физических величин 26, 28, 29, 30, 31, 33, 107, 118  
 Скорость волны групповая 154, 276  
 — звука 158  
 — излучения электромагнитного 153  
 — реакции химической 210  
 — секторная 56  
 — точки 54  
 — угловая 57  
 — фазовая 153  
 Смещение электрическое 110, 111  
 Солнце среднее 47  
 Сон 168



Соппротивление акустическое 161  
 — электрическое 121, 122  
 Сорбция 203  
 Спин 236, 276  
 Степень вакуума 201  
 — поляризации 186  
 — черноты 189  
 Стерadian 26, 45  
 Стилб 323  
 Стокс 319  
 Структура сверхтонкая 275  
 — тонкая 276  
 Сублимация 86, 90  
 Сутки 49  
 — средние солнечные 47, 50  
  
 Твердость 70, 71  
 Текс 316  
 Тело абсолютно твердое 51  
 — серое 189  
 — черное 189  
 Тембр 167  
 Температура Кюри 287  
 — Нееля 287  
 — радиационная 190  
 — сверхпроводящего перехода, критическая 282  
 — термодинамическая 88  
 — Цельсия 91  
 Тепло 94  
 Теплоемкость 96, 210  
 Теплообмен 86  
 Теплоотдача 87  
 Теплопроводность 86, 95  
 Теплота 94  
 — сгорания топлива удельная 101  
 Термин 13  
 Термин-синоним 13, 14  
 Терминология 13  
 Терминоэлемент 13  
 Тесла 129  
 Ток электрический 116  
 Тон 156, 167  
 Тонна 297, 315  
 Точка материальная 59  
 — Нееля 127  
 — реперная 89  
 — тройная вещества 89, 90, 205  
 — — воды 90  
 Траектория точки 52  
 Тысячелетие 49  
  
 Угол Брюстера 186

Угол вращения плоскости поляризации 187  
 — преломляющий 199  
 — телесный 44, 45  
 Узел морской 54  
 Ультразвук 156  
 Уравнение определяющее 21, 22, 290  
 — связи между величинами 17  
 — — — числовыми значениями 18  
 — состояния 84  
 Уровень звукового давления 165  
 — интенсивности звука 165  
 Ускорение свободного падения 56  
 — точки 55, 56,  
 — угловое 58,  
  
 Фаза 83,  
 — колебаний 142  
 Фарад 115  
 Фермион 230  
 Ферромагнетизм 287  
 Ферромагнетизм 126, 288  
 Фокус 198  
 Фон 168  
 Фонон 157  
 Фотон 230  
 Фотоэлектроны 242  
 Фотоэффект 230  
 Фронт волны 148  
 Фугитивность 216, 217  
 Функция волновая 266  
  
 Цикл Карно 87  
 — термодинамический 87  
  
 Частица (в акустике) 156  
 Частота вращения 58  
 — колебаний периодических 143, 144, 157  
 Числа квантовые 223, 236, 266, 268, 281  
 Число Авогадро 206  
 — волновое 153  
 — зарядовое 15  
 — массовое 15, 225  
 — твердости 71  
  
 Шкала Ренкина 92  
 — Реомюра 92  
 — температурная международная практическая 91  
 — — термодинамическая 89

Шкала Фаренгейта 92

Эксергия 100  
 Экситон 288  
 Электрон 231, 288  
 Электронвольт 231, 318  
 Элемент 203  
 Эллипс поляризации 185  
 Энергия 74  
 — внутренняя 97, 98, 209  
 — Гельмгольца 97, 98  
 — Гиббса 97, 98, 215  
 — звуковая 159  
 Энергия излучения 153, 171  
 — кинетическая 74  
 — покоя частицы 233  
 — потенциальная 74

— свободная 98  
 — связи 278  
 Энтальпия 98  
 Энтропия 97, 99  
 Эпоха 49  
 Эрг 318  
 Эрстед 322  
 Эффект пьезоэлектрический 105  
 — реакции химической тепловой 215  
 — туннельный 276  
 — фотоэлектрический 230  
  
 Ядра магические 225  
 Ядро атома 231  
 Яркость 181



Справочное издание

**Чертов Александр Георгиевич**

## **Физические величины**

(терминология, определения, обозначения,  
размерности, единицы)

Зав. редакцией учебно-методической литературы  
по физике и математике **Е. С. Гридасова**

Редактор **Г. Н. Чернышева**

Мл. редактор **Н. П. Майкова**

Художественный редактор **В. И. Пономаренко**

Технический редактор **Л. А. Муравьева**

Корректор **Г. И. Кострикова**

ИБ № 7430

Изд. № ФМ-4. Сдано в набор 01.12.89. Подп. в печать 29.05.90. Формат  
 $84 \times 108^{1/32}$ . Бум. тип. № 2. Гарнитура Таймс. Печать высокая. Объем  
17,64 усл. печ. л. 17,85 усл. кр.-отт. 18,90 уч.-изд. л. Тираж 100 000 экз.  
Зак. № 3518. Цена 1 руб.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул.,  
д. 29/14.

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени  
МПО «Первая Образцовая типография» Государственного комитета СССР  
по печати. 113054, Москва, Валовая, 28.